

Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di ricerca in Ingegneria Informatica ed Automatica

XXVII ciclo



Tesi di Dottorato

**Studio dell'affidabilità degli azionamenti elettrici basati su motori
brushless nell'ambito dei carrelli di atterraggio**

Tutore

Prof. Ing. Francesco Garofalo

Coordinatore

Prof. Ing. Francesco Garofalo

Candidato

Dott. Ing. Ida Manzo

Abstract

Questo lavoro vuol fornire un contributo, attraverso la modellazione ad eventi discreti, allo studio di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici.

Considerando l'ipotesi di un sistema avente una architettura modulare, sono stati realizzati dei modelli, a reti di Petri p/t, per simulare il comportamento logico di alcuni dei componenti presenti nel sistema e le interazioni fra di essi.

Keywords: carrello di atterraggio, reti di Petri

“Dividere ciascuna delle difficoltà da esaminare nel maggior numero di parti possibili e necessarie per meglio risolverla” [1]

“Condurre i miei pensieri ordinatamente, cominciando dagli oggetti più semplici e più facili a conoscersi per risalire a poco a poco, quasi per gradi, fino alle conoscenze più complesse; supponendo che vi sia un ordine anche tra gli oggetti che non precedono naturalmente gli uni agli altri” [1]

René Descartes

Sommario

Introduzione	3
Cap.1 Cenni sull'attuazione negli aeromobili.....	5
1.1 Panoramica sulla evoluzione degli attuatori per azionare superfici di controllo del volo di un aeromobile verso il concetto del more electric	5
1.2 Generalità sui sistemi di attuazione dei carrelli di atterraggio.....	7
1.3 Alcuni vincoli nella progettazione dei carrelli di atterraggio retrattili.....	9
Cap.2 Cenni sui sistemi ad eventi discreti per lo studio di un sistema di azionamento elettrico di un carrello di atterraggio	11
2.1 I sistemi ad eventi discreti.....	11
2.2 Reti di Petri P/T e sistemi di rete	12
2.2.1 Comportamento dinamico.....	16
2.2.2 Reti di Petri e modellazione	20
2.2.3 Modularità e sintesi modulare.....	23
2.2.4 Grafo di raggiungibilità.....	23
2.3 Modelli per la simulazione ad eventi discreti	24
Cap.3 Reti di Petri per la realizzazione di modelli per la simulazione delle	25
integrazioni fra componenti di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici.....	25
3.1 Considerazioni preliminari ed ipotesi semplificative relative alla costruzione delle reti	25
3.2 Considerazioni sul processo di costruzione dei modelli	26
3.3 Procedimento per la realizzazione delle reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico dei componenti isolati	26
3.3.1 Algoritmo per la realizzazione dei modelli di simulazione a reti di Petri P/T del comportamento dei componenti isolati	27
3.4 Procedimento per la realizzazione delle reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico a seguito di integrazione fra componenti	28
3.4.1 Algoritmo modificato per la realizzazione dei modelli di simulazione a rete di Petri P/T del comportamento dei componenti a seguito di integrazione.....	28
Cap.4 Modelli a rete di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico dei componenti isolati.....	30
4.1 Modello di simulazione a rete di Petri P/T dell'attuatore di estensione e ritrazione (ERA).....	30
4.1.1 Semantica della rete marcata.....	32
4.1.2 Evoluzione di stato della rete	34

4.2 Modello di simulazione a rete di Petri P/T dell'attuatore di blocco up/down (UDLA).....	36
4.2.1 Semantica della rete marcata.....	38
4.2.2 Evoluzione di stato della rete	39
4.3 Modello di simulazione a rete di Petri P/T di sensore /interruttore a due stati	40
4.3.1 Semantica della rete marcata.....	41
4.3.2 Evoluzione di stato della rete	42
Cap. 5 Modelli a reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dei componenti a seguito di integrazione.....	44
5.1 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore di soft.....	45
stop	45
5.2 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore end of stroke	50
5.3 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore di soft stop e sensore di end of stroke.....	55
5.4 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – interruttore di Uplock (Downlock)	57
5.5 Modello grafico per la simulazione dell' integrazione ERA – sensore soft stop.....	64
5.6 Modello grafico per la simulazione dell'integrazione ERA – sensore end of stroke	69
5.7 Modello grafico per la simulazione dell'integrazione ERA – sensore soft stop e sensore end of stroke.....	75
Conclusioni	82
Bibliografia	83

Introduzione

Nei moderni aeromobili l'energia prodotta dalla combustione del carburante viene in parte utilizzata per scopi propulsivi, in parte trasformata, attraverso idonei dispositivi, in meccanica, elettrica, idraulica, pneumatica e distribuita alle varie e complesse utenze presenti a bordo, frutto dei continui progressi della tecnologia aeronautica.

Lo smistamento di tali energie alle varie utenze conduce ad una complessa architettura dovuta non solo alla necessità di alimentare utenze distribuite lungo la struttura dell'aeromobile ma anche alla necessità di garantire opportune condizioni di sicurezza. Il che induce a disporre idonee ridondanze. Al fine di ridurre tale complessità, migliorare le prestazioni e garantire sempre alti livelli di sicurezza, i costruttori di aeromobili si sono orientati verso la tendenza ad un usare a bordo maggiormente sistemi di natura elettrica.

L'obiettivo del More Electric Aircraft (MEA) è quello di puntare verso aeromobili in cui l'intero sistema secondario di potenza sia di tipo elettrico.

Sulla scia di questo traguardo, sono da anni in atto studi miranti a verificare la affidabilità dei sistemi di natura elettrica in sostituzione dei sistemi convenzionali ad oggi in uso a bordo degli aeromobili. Studi che avranno indubbe ricadute anche sulle normative che dovranno conseguentemente essere adeguate all'uso delle tecnologie elettriche in sostituzione delle tecnologie attualmente in uso.

Il nostro lavoro vuol fornire un contributo a questi studi con particolare riferimento all'uso di sistemi di natura elettrica per l'azionamento dei carrelli di atterraggio che rappresentano uno dei campi in cui si stanno conducendo studi miranti alla sostituzione di attuatori idraulici con attuatori di tipo elettrico.

In particolare, questo lavoro vuole fornire un contributo, attraverso la modellazione ad eventi discreti, allo studio di un sistema integrato per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici.

Nella prima parte del lavoro, viene presentata una panoramica sull'uso degli attuatori in ambito aeronautico per l'azionamento di superfici di volo al fine di mostrare l'influenza del MEA (More Electric Aircraft) sulle relative tecnologie. Dopodiché, viene presentata una introduzione ad alcune delle soluzioni per l'estensione e la ritrazione dei carrelli di atterraggio, in base alle dimensioni degli aeromobili.

Ciò, assieme ad un accenno ad alcuni dei vincoli che è necessario garantire nella progettazione di un sistema complesso quale è un carrello di atterraggio, intende introdurre alla problematica inerente il passaggio da un sistema convenzionale per l'attuazione del meccanismo di estensione e

ritrazione di un carrello di atterraggio ad uno elettrico ed alle ragioni che hanno motivato questo lavoro.

Prima di procedere con l'esposizione del procedimento seguito per la messa a punto dei modelli, viene presentato un richiamo ai sistemi ad eventi discreti, alla teoria delle reti di Petri P/T (Posto/ Transizione) ed alle notazioni che sono state utilizzate nel corso del lavoro.

In particolare, viene esposta la corrispondenza fra rappresentazione grafica e modelli matematici in modo da poter proseguire l'esposizione operando principalmente con la rappresentazione grafica. In questo modo si è cercato di dare maggiore risalto al contenuto informativo dei modelli realizzati, trattando matematicamente concetti complessi con una interfaccia grafica che mantenga l'attenzione sul processo fisico sottostante.

Nel seguito viene presentato prima il procedimento seguito per la messa a punto di modelli a reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico di componenti isolati.

Subito dopo viene presentato il procedimento seguito per la realizzazione di modelli a reti di Petri P/T per la simulazione della integrazione fra componenti del sistema.

In particolare, verranno esposti i passi di un algoritmo messo a punto per poter sviluppare i modelli di simulazione del comportamento dinamico dei componenti isolati. E la versione modificata dello stesso algoritmo per poter realizzare i modelli di simulazione del comportamento dinamico della integrazione fra componenti.

Infine, vengono presentati alcuni dei modelli realizzati sulla base dei passi del citato algoritmo e della sua versione modificata con le relative considerazioni che è stato possibile effettuare sulla base dei risultati emersi dalle simulazioni.

Cap.1 Cenni sull'attuazione negli aeromobili

I miglioramenti cui protende la tecnologia aeronautica devono le loro origini ad esigenze fra cui riduzione del peso, miglioramento dell' affidabilità, miglioramento delle prestazioni.

La tendenza attuale della industria aeronautica è orientarsi verso aeromobili “more electric” ossia aeromobili in cui sistemi elettrici vengano adottati in sostituzione di quelli convenzionali.

Secondo il concetto del MEA, la migrazione verso l'elettrico del sistema secondario di potenza potrebbe non solo consentire una riduzione del peso ma ridurre la complessità oggi presente nella architettura di generazione e distribuzione della energia secondaria a bordo di un aeromobile con probabile miglioramento della efficienza e della affidabilità. Sono pertanto in atto da anni studi per la verifica di tali requisiti.

Fra le tendenze verso l'attuazione elettrica sono da annoverare gli azionamenti per il controllo delle superfici di volo, di cui di seguito viene fornita una rapida panoramica, e gli azionamenti per il controllo dei meccanismi di estensione e ritrazione dei carrelli retrattili.

1.1 Panoramica sulla evoluzione degli attuatori per azionare superfici di controllo del volo di un aeromobile verso il concetto del more electric

Un attuatore di uso convenzionale per l'attuazione delle superfici di volo di un aeromobile è di tipo lineare. Esso è costituito da un martinetto idraulico in cui attraverso una servo valvola viene diretto il flusso di fluido idraulico sottopressione, proveniente dal circuito idraulico di bordo, in un opportuno lato del pistone consentendo il movimento nella direzione desiderata.

Per applicazioni ritenute critiche, può essere previsto il collegamento con idoneo sistema di alimentazione supplementare.

Tipicamente, per inviare comandi all'attuatore, il pilota, dalla cabina agendo su un opportuno comando trasmette un movimento che agisce su una valvola collegata al martinetto.

La trasmissione dei comandi fra cabina e valvola può avvenire sia meccanicamente, attraverso vari metodi fra cui sistemi di cavi e pulegge e sistemi a barre di controllo “spingi e tira”, sia elettricamente. Quest'ultima soluzione è nota come sistema di controllo fly by wire (FBW).

Gli attuatori lineari di tipo convenzionale sono generalmente utilizzati per superfici di volo in cui è richiesta una rapida risposta ma i carichi aerodinamici sono relativamente leggeri.

Esistono altre applicazioni in cui invece una capacità di resistere od applicare carichi elevati è requisito fondamentale rispetto alla rapidità di risposta. In tali casi attraverso uno screwjack è possibile ottenere una risposta meno rapida ma con un ampio vantaggio meccanico.

La tendenza a orientarsi verso sistemi “more electric” ha portato all’adozione di attuatori denominati IAP (Integrated Actuator Package).

La funzione di questi attuatori è simile a quella di un attuatore lineare convenzionale. La differenza consiste nel fatto che il fluido idraulico sottopressione proviene da una pompa idraulica azionata da un motore elettrico trifase a velocità costante. Attraverso un opportuno meccanismo, controllato tramite una servo valvola, è possibile variare il flusso del fluido generato dalla pompa e quindi determinare lo spostamento desiderato dell’attuatore.

Lo svantaggio principale di questo attuatore consiste nel fatto che anche quando è nello stato stazionario la pompa è in rotazione a velocità costante.

Questo problema è stato affrontato negli attuatori denominati EHA (Electro-Hydrostatic Actuator). Mediante lo EHA si cerca di ottenere una forma di attuazione più efficiente.

Come lo IAP, esso rappresenta un sistema di azionamento idraulico locale basato su un motore elettrico trifase per azionare una pompa idraulica. La differenza con lo IAP consiste nel tipo di pompa e di motore elettrico usato per azionare la pompa. Il motore elettrico è difatti un trifase a velocità variabile, la pompa è a displacement costante.

Il vantaggio di questa soluzione tecnologica consiste nel fatto che quando l’attuatore è in stato quiescente, l’energia assorbita è soltanto quella necessaria ad alimentare l’elettronica di controllo.

Un'altra soluzione possibile è quella degli attuatori denominati EBHA (Electrical Backup Hydraulic Actuator) che consentono un funzionamento di tipo idraulico convenzionale ed un funzionamento simile all’EHA come backup.

Attraverso la tecnologia dello EMA (Electromechanical Actuator) viene fatto un deciso cambio di rotta.

Senza scendere troppo in dettaglio, un generico EMA consiste di un motore elettrico, un riduttore di velocità ed un idoneo dispositivo di trasmissione per l’accoppiamento al sistema da azionare.

I notevoli progressi compiuti nel campo dei motori elettrici fanno sì che molto interesse sia concentrato intorno a questa tecnologia.

Oltre alla possibilità di avere ingombri e peso ridotti, rispetto ad una attuazione idraulica convenzionale, l’attuazione elettrica può offrire ulteriori potenziali benefici. Fra cui la riduzione del numero di componenti richiesti e l’assenza di perdite di fluido. Inoltre, la possibilità di ricorrere a motori elettrici brushless consente di eliminare le problematiche delle scintille che potevano rendere il motore elettrico pericoloso in ambienti infiammabili e di eliminare il problema della manutenzione delle spazzole.

I motori brushless sono motori elettrici senza spazzole a magneti permanenti.

Il principio su cui è basato il loro funzionamento è sempre l' interazione fra campo magnetico statorico e campo magnetico rotorico. La commutazione della corrente negli avvolgimenti non è però realizzata attraverso il sistema collettore/spazzole ma viene realizzata attraverso un circuito di commutazione che, sulla base di un sensore in grado di rilevare la posizione del rotore, genera la sequenza con cui viene commutata la corrente negli avvolgimenti.

Ciò su cui è incentrata l'attenzione è l'affidabilità dell'attuatore.

Fra i requisiti richiesti ad un motore per uso aeronautico vi è la tolleranza ai guasti.

Per poter soddisfare ad un tale requisito, a seconda delle applicazioni, sono adottate soluzioni di moltiplicazione dei motori (es. duplicazione, triplicazione).

Nel caso di motore elettrico, la tolleranza ai guasti viene affrontata a vari livelli. Fra questi vi è una opportuna n-plicazione delle fasi.

Una delle problematiche che limita l'uso di questo attuatore in applicazioni ritenute critiche è il rischio di inceppamento meccanico. Fra le soluzioni in studio per affrontare tale problema vi è l'uso di attuatori senza riduttori.

1.2 Generalità sui sistemi di attuazione dei carrelli di atterraggio

Fra le utenze di natura idraulica ad oggi presenti sui moderni aeromobili sono da annoverare i carrelli di atterraggio retrattili.

I carrelli retrattili sono la soluzione tecnologica che fornisce un compromesso fra la necessità di contrastare la resistenza parassita cui è soggetto l'aeromobile quando il carrello è esposto al flusso di aria, costi e peso aggiuntivo dovuto ai meccanismi necessari per stivare il carrello.

Esso consta difatti di un considerevole insieme di componenti che gli consentono di svolgere la sua funzione. Fra questi, meccanismi per estensione e ritrazione, perni di articolazione, montanti di resistenza, ammortizzatori, componenti di bloccaggio, rilevamento, segnalazione, sicurezza. In aggiunta, vi sono i meccanismi per il governo del carrello anteriore, nel caso questi sia governabile. Le soluzioni tecniche per la realizzazione di carrelli retrattili sono molteplici.

Nel caso di piccoli aeromobili, la soluzione più semplice è quella di ricorrere ad una leva meccanicamente collegata al carrello. Il pilota azionando la leva, attraverso un vantaggio meccanico, estende e ritrae il carrello.

Su alcuni tipi di aeromobili abbastanza leggeri e di piccole dimensioni, è possibile trovare soluzioni "all electric". In questo caso, il sistema per estendere e ritrarre il carrello è basato su di un motore elettrico, un riduttore ed un dispositivo di conversione del moto da rotatorio a lineare.

Un'altra possibile soluzione è quella di un sistema elettro/idraulico denominato sistema power pack. Tale sistema è composto di parecchi elementi richiesti in un sistema idraulico. Fra questi vi sono serbatoio per il fluido, pompa idraulica azionata da motore elettrico reversibile, filtro, valvole di controllo della pressione, valvola di rilevamento termico, valvola di deviazione. E' anche possibile che alcuni sistemi power pack comprendano una pompa manuale di emergenza.

Attraverso il fluido del power pack è possibile azionare l'attuatore idraulico necessario per estendere e ritrarre ciascun carrello. A tal fine, per ciascuno di essi è prevista la connessione al circuito idraulico di alimentazione in modo che, attraverso opportune valvole, il fluido possa entrare in uno dei lati up/down degli attuatori e consentire di ottenere il movimento desiderato.

Il sistema è fatto in modo che il motore, una volta avviato, a seconda del verso di rotazione, spinge la pompa ad inviare il fluido in opportuni lati del circuito.

Per abbassare e richiamare i carrelli, il pilota seleziona una opportuna manopola presente nella cabina di pilotaggio. Attraverso la selezione di tale manopola sulle posizioni down e up, è possibile avviare il processo di estensione e ritrazione.

In particolare, per abbassare i carrelli, essa viene selezionata sulla posizione down. Ciò consente ad un interruttore di accedere il motore nel power pack.

Una volta avviato, il motore gira nel verso che spinge la pompa ad inviare il fluido in pressione verso il lato del circuito che alimenta gli attuatori in modo da ottenere il movimento per l'abbassamento.

Per consentire al fluido di raggiungere gli attuatori, si sfrutta la pressione che agisce su una valvola di deviazione. Attraverso una ulteriore valvola, detta di restrizione, viene controllato il flusso del fluido in pressione entrante nell'attuatore del carrello anteriore.

Il sistema è realizzato in modo che il fluido presente nel lato opposto degli attuatori viene opportunamente ricondotto nel serbatoio.

Inoltre, è progettato in modo che quando i carrelli sono in posizione down e sono bloccati, la pressione nel circuito aumenta. Attraverso una opportuna valvola di controllo, viene mantenuto il livello idoneo di pressione nel circuito. Attraverso opportuni interruttori viene realizzato lo spegnimento della pompa.

Per ritrarre i carrelli, il pilota seleziona la manopola presente in cabina sulla posizione up. Ciò avvia il motore elettrico che consente alla pompa di inviare il fluido in pressione verso l'altro lato del circuito. In tal modo, attraverso una opportuna valvola, il fluido può entrare negli attuatori dal lato che consente loro il moto nel verso opposto.

Durante questa attività, vengono rilasciati i blocchi meccanici necessari a tenere bloccati i carrelli in posizione down ed inizia la ritrazione.

Quando i carrelli sono stati ritratti, viene ridotta la potenza della pompa e viene usata la pressione idraulica per tenere i carrelli in posizione.

Le cose diventano chiaramente più complesse spostandosi verso i grossi aeromobili.

Nel caso di grossi aeromobili, i convenzionali sistemi di estensione e ritrazione dei carrelli sono alimentati idraulicamente.

Il fluido idraulico necessario per il funzionamento degli attuatori coinvolti proviene dal sistema idraulico. Di conseguenza, oltre ai componenti già citati, martinetti idraulici per ottenere il movimento, locks per ottenere il blocco dei carrelli, valvole di priorità e di sequenza, sono presenti ulteriori elementi. Peraltro, la complessità aumenta perché i vari elementi coinvolti devono essere collegati in modo tale da realizzare l'estensione e la ritrazione dei carrelli in perfetta sequenza con l'apertura e chiusura dei relativi portelloni.

1.3 Alcuni vincoli nella progettazione dei carrelli di atterraggio retrattili

La progettazione dei carrelli di atterraggio deve soddisfare a severe normative di sicurezza emesse da enti nazionali ed internazionali.

Per quel che concerne il blocco dei carrelli, la normativa richiede che essi vengano bloccati nelle posizioni up e down utilizzando idonei locks meccanici.

A tal fine è previsto che i locks per il blocco di un carrello siano di due tipologie: uplocks e downlocks. Essi possono essere sia interni che esterni agli attuatori.

Inoltre è richiesto che sia previsto un idoneo meccanismo per il rilascio di emergenza degli uplocks. I locks oltre a svolgere la funzione di bloccaggio, devono essere in grado di tollerare i carichi cui è soggetto l'aeromobile evitando indesiderate estensioni o ritrazioni del carrello.

Sia che il lock sia attivato idraulicamente sia che sia attivato elettricamente, esso deve svolgere la sua funzione correttamente. Non è difatti consentito ad un lock attivato idraulicamente di sbloccare il carrello a seguito di variazioni della pressione. Analogamente, ad un lock attivato elettricamente non è consentito sbloccare il carrello a seguito di fault nel sistema elettrico.

Sono inoltre previsti interruttori contattati direttamente dai locks per il rilevamento dello stato di blocco del carrello nella posizione raggiunta.

Oltre al funzionamento in condizioni cosiddette normali, deve essere previsto un funzionamento in condizioni di emergenza. In particolare, è necessario fornire un sistema di estensione/sblocco di emergenza che sia distinto da quello principale.

In genere si progetta il carrello in modo che abbia una caratteristica di free fall in modo da poterla utilizzare nel caso di failure nel sistema di estensione.

Per questa sintesi si è fatto riferimento a: [2],[3],[4],[5].

Cap.2 Cenni sui sistemi ad eventi discreti per lo studio di un sistema di azionamento elettrico di un carrello di atterraggio

Un carrello di atterraggio svolge diverse funzioni. Esso oltre a sostenere l'aeromobile durante le attività al suolo, controlla le forze di impatto sull'aeromobile all'atterraggio. Questo compito è ottenuto principalmente assorbendo lo shock dovuto all'impatto, convertendo una parte dell'energia accumulata in calore e trasferendo alla struttura dell'aeromobile impulsi di forza opportunamente ridotti e differenziati nel tempo.

Per le funzioni che deve svolgere, rappresenta un sistema piuttosto complesso costituito di molti componenti fra cui ammortizzatori, freni, dispositivi di segnalazione, dispositivi di controllo, dispositivi di sicurezza, meccanismi di estensione e ritrazione, dispositivi di blocco.

Essendo il carrello di atterraggio uno dei componenti critici per la sicurezza di un aeromobile si comprende quanto forte sia l'attenzione per la valutazione della affidabilità di un sistema elettrico per l'azionamento del meccanismo di estensione e ritrazione.

Il passaggio dalla tecnologia idraulica a quella elettrica comporta non soltanto la sostituzione degli attuatori idraulici con attuatori elettrici ma, la funzione prima svolta dalle valvole (di sequenza, di priorità, di controllo ecc.) deve essere soppiantata da altri componenti. Facendo quindi entrare in gioco sensori ed elementi di controllo. Di conseguenza, lo sviluppo del prodotto richiede particolare attenzione.

In questo capitolo viene presentato un breve richiamo ai sistemi ad eventi discreti, alla teoria delle reti di Petri ed alle notazioni utilizzate nel corso del lavoro.

A tal fine, si è usati come riferimento [8],[9].

2.1 I sistemi ad eventi discreti

La teoria del controllo classico tratta sistemi modellati mediante equazioni differenziali o alle differenze. I sistemi ad eventi discreti consentono di studiare sistemi dinamici la cui evoluzione di stato è legata al verificarsi di eventi.

Un sistema ad eventi discreti è un sistema dinamico caratterizzato da uno spazio di stato ed una legge di transizione che consente, al verificarsi degli eventi, l'evoluzione del sistema da uno stato ad un altro.

Attraverso la realizzazione di modelli matematici ad eventi discreti, è possibile rappresentare il comportamento di un sistema a seguito del verificarsi di eventi. Questa astrazione del comportamento consente di osservare traiettorie di eventi attraverso cui evolve il sistema. Esistono diversi approcci alla modellazione e altrettante metodologie correlate per lo studio dei sistemi modellati. Reti di Petri, automi, catene di Markov rappresentano alcuni dei vari strumenti di modellazione a disposizione.

Le reti di Petri costituiscono un insieme di modelli sia di tipo logico che temporizzato (reti di Petri posto/transizione o reti di Petri p/t (o P/T), reti di Petri deterministiche, reti di Petri stocastiche). Di questi, le reti p/t costituiscono dei modelli logici. Attraverso tali modelli è possibile studiare caratteristiche qualitative e comportamentali del sistema modellato.

Per poter effettuare analisi prestazionali del sistema ad eventi discreti, è possibile ricorrere alle reti di Petri temporizzate. Queste sono caratterizzate dall'associazione di opportune strutture di temporizzazione alla evoluzione della rete.

2.2 Reti di Petri P/T e sistemi di rete

Una rete di Petri P/T (posto / transizione) è un grafo orientato bipartito.

Il grafo è costituito da due tipi di nodi denominati, rispettivamente, posti e transizioni.

Graficamente, i posti sono rappresentati da cerchi, le transizioni da barre o da rettangoli.

Gli archi orientati che connettono posti e transizioni sono classificati come archi di ingresso (input) o di uscita (output) rispetto alle transizioni.

Un arco orientato da un posto verso una transizione è detto di input, un arco orientato da una transizione verso un posto è detto di output.

Per rappresentare archi multipli (sia di input che di output), graficamente si usa associare un peso a ciascun arco.

I posti possono contenere dei gettoni (tokens).

Graficamente, ogni token è rappresentato da un pallino nero all'interno del cerchio rappresentativo del posto. Per rappresentare sinteticamente più tokens su un posto, si usa ricorrere ad un numero intero.

Il numero di tokens in ciascun posto definisce lo stato di una rete di Petri ed è denominato marcatura. Lo stato iniziale di una rete è detto marcatura iniziale.

Una rete cui è stata associata una marcatura si dice rete marcata o sistema di rete.

Matematicamente, una rete di Petri P/T è definita come una struttura $N = \{P, T, Pre, Post\}$ dove:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ è un insieme finito di m posti, $m \geq 0$
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ è un insieme finito di n transizioni, $n \geq 0$
- $T \cap P = \emptyset$ ossia che i due insiemi sono disgiunti
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ è la funzione di pre-incidenza (rappresentata con una matrice $m \times n$) che descrive gli archi diretti dai posti verso le transizioni (archi di input).
- $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ funzione di post-incidenza (rappresentata con una matrice $m \times n$) che descrive gli archi diretti dalle transizioni verso i posti (archi di output).

Per compattare le informazioni, si può ricorrere ad una matrice, definita come: $C = Post - Pre$ dove $Post$ è la matrice di post-incidenza e Pre la matrice di pre-incidenza.

Essendo $Post$ e Pre delle matrici di numeri interi non negativi, la matrice di incidenza è una matrice di interi.

A seguito della sua definizione, la matrice di incidenza può perdere qualche informazione sulla struttura della rete.

La marcatura di una rete è una funzione $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ (rappresentata con un vettore $m \times 1$) che associa ad ogni posto un numero intero non negativo di gettoni (tokens).

Una rete marcata o sistema di rete è una struttura $S = \{P, T, Pre, Post, M_0\}$ ed è rappresentata mediante la notazione $\langle N, M_0 \rangle$.

Talvolta, con abuso di linguaggio, si fa riferimento ad una rete marcata (o sistema di rete) con la sola denominazione di rete.

Esempio

Nella figura che segue è riportato un semplice esempio di rete di Petri marcata.

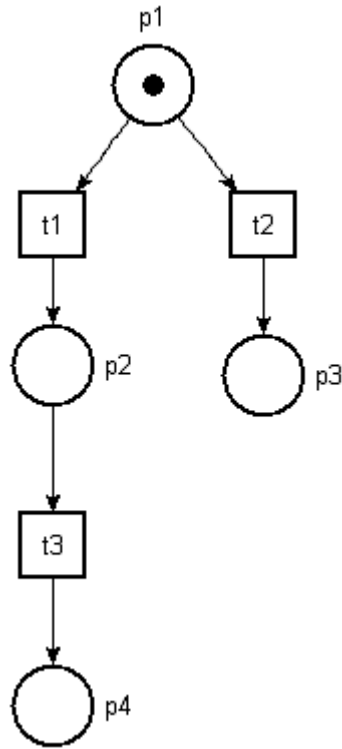


Figura 1: esempio di rete di Petri marcata

La semplice rete marcata illustrata in figura è caratterizzata dall'insieme di quattro posti

$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ e l'insieme di tre transizioni $T = \{t_1, t_2, t_3\}$.

La transizione t_1 presenta un solo arco di ingresso proveniente dal posto p_1 . E presenta un arco di uscita verso il posto p_2 .

La transizione t_2 presenta un solo arco di ingresso proveniente dal posto p_1 . E presenta un arco di uscita verso il posto p_3 .

La transizione t_3 presenta un arco di ingresso proveniente dal posto p_2 ed uno di uscita verso il posto p_4 .

Le matrici che rappresentano le funzioni di pre-incidenza e post-incidenza sono pertanto le seguenti:

$$Pre = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad Post = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La marcatura rappresentata in figura corrisponde al vettore $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

Osservazione sulla rappresentazione della marcatura

La marcatura di una rete può essere rappresentata anche mediante una somma formale. Tale somma è rappresentata mediante una combinazione lineare dei posti della rete in cui ciascun coefficiente rappresenta il numero di tokens presenti sul posto.

Nel caso dell'esempio in esame, la marcatura $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ è rappresentabile mediante la relazione $M_0 = [p_1]^T$. Essa rappresenta la somma formale con coefficienti nulli per i posti p_2 , p_3 e p_4 .

Questa notazione, molto pratica, sarà spesso usata nel seguito del lavoro.

Di seguito è riassunta la corrispondenza fra la rappresentazione grafica illustrata e le notazioni corrispondenti.

$$S = \{P, T, Pre, Post, M\} :$$

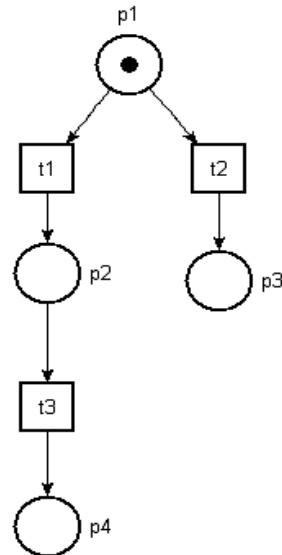
- $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$

- $T = \{t_1, t_2, t_3\}$

- $Pre = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

- $Post = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (M_0 = [p_1]^T)$



2.2.1 Comportamento dinamico

Il comportamento dinamico di una rete marcata è soggetto alla regola di abilitazione e scatto (o sparo) delle transizioni.

Una transizione t può sparare (o scattare) soltanto se è abilitata in una certa marcatura.

Una transizione si dice abilitata in una data marcatura M se : $\forall p \in \bullet t, M(p) \geq Pre(p, t)$
dove :

$\bullet t = \{p \in P \mid Pre(p, t) > 0\}$ denota l'insieme dei posti di ingresso alla transizione t .

In altri termini, una transizione t è abilitata in una marcatura M , se in ciascun posto p di ingresso a t ci sono almeno $Pre(p, t)$ gettoni (tokens).

Per indicare che una transizione t è abilitata da una marcatura M si scrive: $M[t > .$

La notazione $\neg M[t > .$ denota invece la situazione in cui una transizione t non è abilitata in una marcatura M .

Una transizione t abilitata in una marcatura M può scattare (o sparare).

Lo sparo della transizione t rimuove $Pre(p, t)$ tokens da ciascun posto $p \in \bullet t$ e crea $Post(p, t)$ tokens in ogni posto $p \in t \bullet$ dove:

$t \bullet = \{p \in P \mid Post(p, t) > 0\}$ rappresenta l'insieme dei posti di uscita dalla transizione t .

Nel seguito, per distinguere la notazione dell'insieme dei posti in ingresso od in uscita da una transizione dal simbolo di elencazione, si utilizzeranno le parentesi tonde.

Lo sparo di una transizione produce un cambiamento della marcatura della rete.

Il passaggio da una marcatura M ad una nuova marcatura M' è governato dalla regola:

$$M' = M + Post(\cdot, t) - Pre(\cdot, t).$$

Per indicare che il passaggio da una marcatura M ad una marcatura M' è avvenuto a seguito dello sparo della transizione t , si scrive $M[t > M'$.

Concatenando elementi di T , si ottiene l'insieme delle sequenze di transizioni T^* .

La sequenza di lunghezza zero è denominata sequenza vuota ed è indicata con ϵ .

Una sequenza di transizioni $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k \in T^*$ si dice abilitata da una marcatura M se :
la transizione t_1 è abilitata da M ed il suo sparo conduce alla marcatura

$$M_1 = M + Post(\cdot, t_1) - Pre(\cdot, t_1),$$

la transizione t_2 è abilitata da M_1 ed il suo sparo conduce alla marcatura

$$M_2 = M_1 + Post(\cdot, t_2) - Pre(\cdot, t_2)$$

e così via.

Per denotare che una sequenza di transizioni $\sigma \in T^*$ è abilitata da una marcatura M si usa la notazione $M[\sigma >]$.

Alla sequenza di scatti corrispondenti alla sequenza $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k \in T^*$ abilitata dalla marcatura M corrisponde la traiettoria:

$$M[t_1 > M_1] [t_2 > M_2] \dots [t_k > M'].$$

Per indicare che lo scatto della sequenza $\sigma \in T^*$, abilitata da una marcatura M , conduce alla nuova marcatura M' , si scrive $M[\sigma > M']$.

La sequenza vuota è abilitata in ogni marcatura e per essa vale $M[\epsilon > M]$.

Considerata una rete marcata $\langle N, M_0 \rangle$, l'insieme di tutte le sequenze di transizioni che possono scattare a partire dalla marcatura iniziale M_0 determina una specifica dinamica.

Il comportamento di una rete marcata $\langle N, M_0 \rangle$ è rappresentato dall'insieme :

$$L(N, M_0) = \{ \sigma \in T^* \mid M_0[\sigma >] \}$$

che rappresenta l'insieme delle sequenze di scatto che sono abilitate nella marcatura M_0 .

Data una rete marcata $\langle N, M_0 \rangle$, una marcatura M è raggiungibile da M_0 se

$$\exists \sigma \in L(N, M_0) \mid M_0[\sigma > M]$$

ovvero se esiste almeno una sequenza di scatto abilitata dalla marcatura M_0 tramite cui è possibile raggiungere la marcatura M .

L'insieme:

$$RS(N, M_0) = \{ M \in N^m : \exists \sigma \in L(N, M_0) \mid M_0[\sigma > M] \}$$

è l'insieme delle marcature raggiungibili a partire dalla marcatura iniziale M_0 ed è detto insieme di raggiungibilità della rete marcata.

Esempio di abilitazione e sparo di una transizione

Con riferimento alla rete marcata di figura 1, riportata per comodità di seguito, :

$$\begin{aligned} (\bullet t_1) &= \{p_1\}, M_0(p_1) \geq Pre(p_1, t_1) && \rightarrow M_0[t_1 > \\ (\bullet t_2) &= \{p_1\}, M_0(p_1) \geq Pre(p_1, t_2) && \rightarrow M_0[t_2 > \\ (\bullet t_3) &= \{p_2\}, M_0(p_2) < Pre(p_2, t_3) && \rightarrow \neg M_0[t_3 > \end{aligned}$$

Ossia, nella marcatura $M_0 = [p_1]^T$, risultano abilitate entrambe le transizioni t_1 e t_2 ma non la transizione t_3 . Di conseguenza, soltanto t_1 o t_2 possono scattare (o sparare).

Con riferimento alla transizione t_1 , un suo sparo rimuove il token dal posto p_1 e ne crea uno nel posto p_2 .

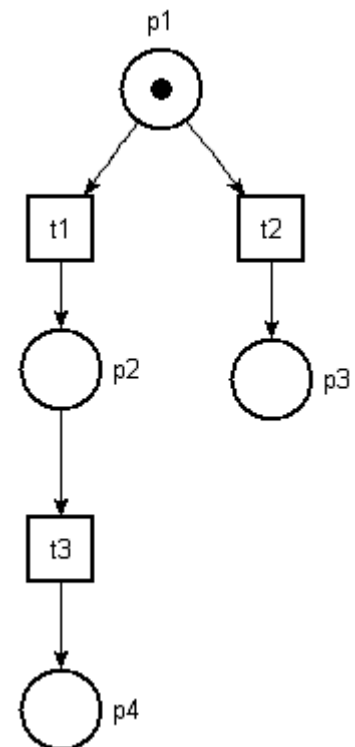
La nuova marcatura raggiunta sarà pertanto: $M_1 = [p_2]^T$.

In questa nuova marcatura è abilitata la sola transizione t_3 .

Lo sparo di t_1 produce, a partire dalla marcatura $M_0 = [p_1]^T$, la traiettoria : $M_0[t_1 > M_1[t_3 >$.

Nella figura seguente è illustrata la rete nelle due marcature.

L'acronimo PN (Petri Net) è usato per riferirsi sinteticamente ai termini "rete di Petri".



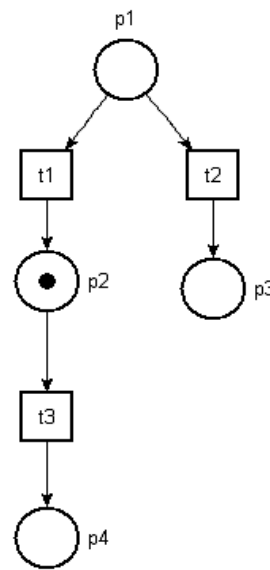
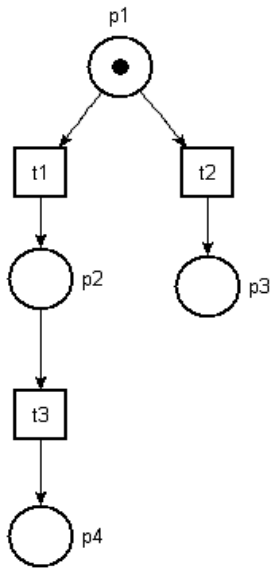


Figura 2: a) PN nella marcatura $M_0 = [p_1]^T$

b) PN nella marcatura $M_1 = [p_2]^T$ dopo lo sparo della transizione t_1

Nella figura a destra si può visualizzare la situazione sopra esposta ovvero che nella nuova marcatura la transizione t_2 non è più abilitata, non essendovi più tokens nel posto che la precede. Questa situazione è nota come conflitto strutturale.

Discorso analogo si sarebbe avuto se fosse scattata prima la transizione t_2 .

Nel caso di sparo di t_2 , la traiettoria seguita dal sistema sarebbe stata invece $M_0[t_2 > M_2$.

Di seguito è illustrata la rappresentazione della rete nelle due marcature.

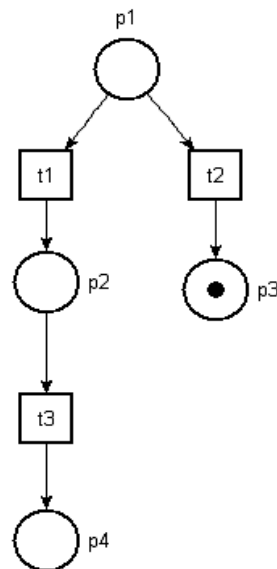
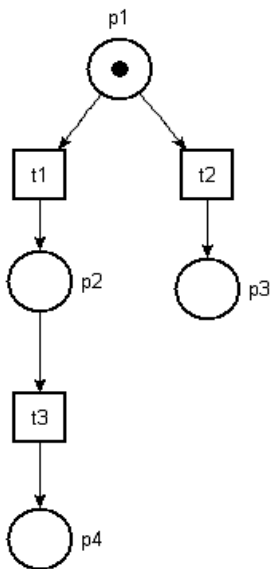


Figura 3: a) PN nella marcatura $M_0 = [p_1]^T$

b) PN nella marcatura $M_2 = [p_3]^T$ dopo lo sparo di t_2

Quando si usano le reti di Petri per modellare i sistemi, i posti rappresentano condizioni e le transizioni rappresentano eventi. Le marcature rappresentano gli stati in cui il sistema può trovarsi.

2.2.2 Reti di Petri e modellazione

I sistemi ad eventi discreti sono sistemi caratterizzati dal fatto che l'accadimento asincrono degli eventi determina l'evoluzione del comportamento dinamico. L'evoluzione dello stato del sistema è pertanto event-driven.

Benchè l'accadimento degli eventi sia asincrono, esiste un ordine in cui essi si manifestano.

Tale ordine può dipendere da vincoli di natura diversa.

Nella realizzazione di un modello a reti di Petri, questa caratteristica si traduce nel definire vincoli sull'ordine in cui le transizioni possono scattare.

Per rappresentare tali vincoli, è possibile ricorrere ad opportune strutture: sequenza, parallelo, sincronizzazione, scelta.

La **sequenza** è la struttura mediante cui è possibile rappresentare il fatto che gli eventi si verificano secondo un preciso ordine.

Nella figura che segue è riportato un esempio di struttura che rappresenta una evoluzione in sequenza.

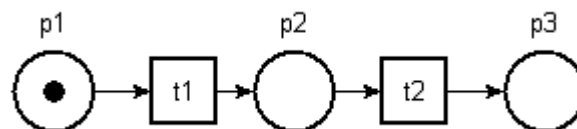


Figura 4: esempio di struttura di sequenza

La struttura di **parallelo**, detta anche concorrenza strutturale, rappresenta la situazione in cui l'ordine di accadimento degli eventi non è prestabilito.

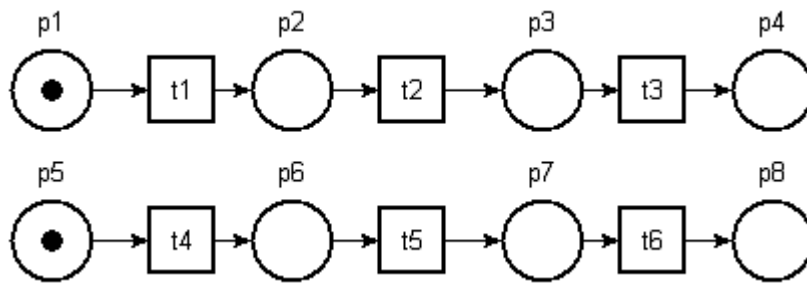


Figura 5: esempio di struttura di parallelo

Con riferimento alla figura, ciascuna sequenza è caratterizzata da un preciso ordine di accadimento ma fra le due sequenze non vi è necessariamente sincronismo. Le due strutture sono concorrenti. Attraverso la struttura di **sincronizzazione** si modella la situazione in cui due o più sequenze concorrenti si sincronizzano al verificarsi di un dato evento.

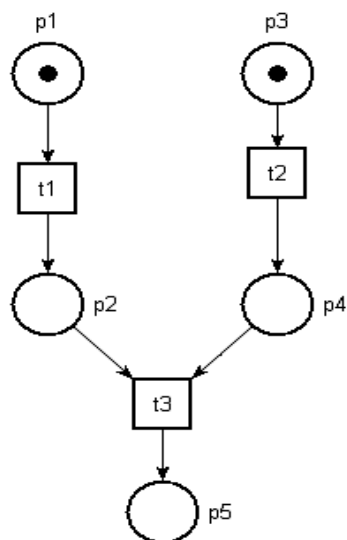


Figura 6: esempio di struttura di sincronizzazione

La struttura di **scelta**, detta anche conflitto strutturale, rappresenta la situazione in cui si può verificare un solo evento fra quelli possibili.

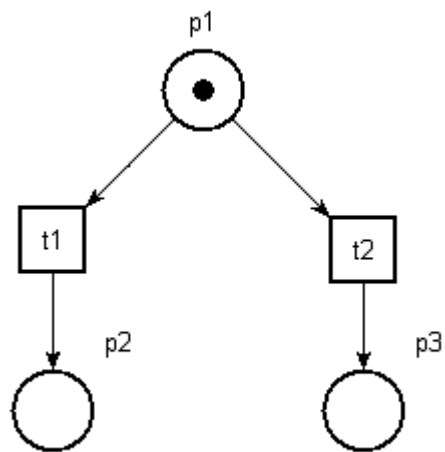


Figura 7: esempio di struttura di scelta

Aggiungendo una semantica alle strutture elencate è possibile rappresentare le variazioni riguardanti le marcature.

Fra le principali strutture disponibili vi è la mutua esclusione.

Nella figura che segue ne è riportato un esempio.

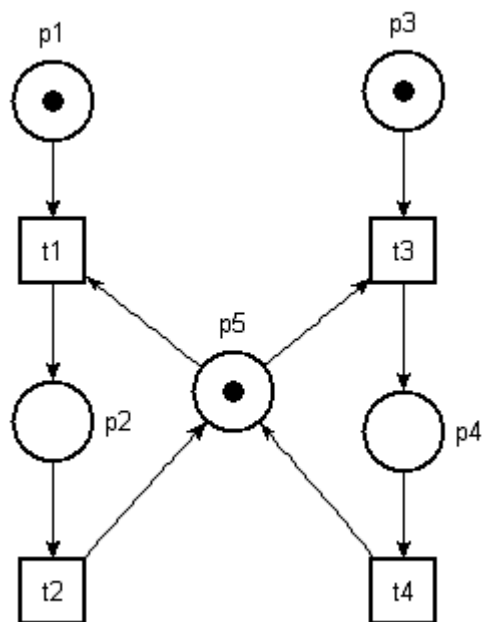


Figura 8: esempio di rete con struttura per mutua esclusione

2.2.3 Modularità e sintesi modulare

Una delle caratteristiche dei sistemi ad eventi discreti è di essere in genere modulari. Se un sistema è composto da diversi sottosistemi, fra loro interagenti, è possibile in alcuni casi rappresentare ogni sottosistema componente, visto come modulo, mediante un proprio modello. Dopodichè, attraverso la sintesi modulare è possibile realizzare il modello del sistema complessivo.

Le reti di Petri essendo una delle possibili tecniche di modellazione ad eventi discreti rappresentano uno degli strumenti a disposizione per realizzare modelli di sistemi attraverso la sintesi per moduli. Esse, rispetto agli automi, hanno il vantaggio di non perdere la caratteristica di modularità a mano a mano che si realizza il modello complessivo.

2.2.4 Grafo di raggiungibilità

Data una rete marcata $\langle N, M_0 \rangle$ ed il suo insieme di raggiungibilità, $RS(N, M_0)$, il grafo di raggiungibilità, $GR(N, M_0)$, è un multigrafo etichettato diretto in cui ogni nodo corrisponde ad una marcatura raggiungibile ed ogni arco rappresenta una transizione.

L'etichetta associata all'arco indica la transizione il cui sparo produce il cambiamento di marcatura.

Il nodo iniziale è rappresentato dalla marcatura M_0 .

Attraverso il grafo di raggiungibilità è possibile studiare proprietà comportamentali fra cui raggiungibilità, reversibilità, deadlock / livelock. Tali analisi sono dipendenti dalla marcatura iniziale.

La proprietà di raggiungibilità consente di studiare i possibili stati in cui può trovarsi il sistema modellato, a partire da un determinato stato iniziale.

La proprietà di reversibilità consente di studiare se il sistema modellato può essere riportato nello stato iniziale.

La presenza di deadlock consente di osservare se il sistema modellato è caratterizzato da uno stato in cui non vi è alcuna transizione che possa sparare. La presenza di livelock consente di studiare se esiste qualche sottoinsieme di stati da cui non è possibile uscire verso gli altri stati del grafo di raggiungibilità.

2.3 Modelli per la simulazione ad eventi discreti

La costruzione di un modello matematico è il presupposto per lo studio di un qualsiasi sistema dinamico.

Come detto, le reti di Petri rappresentano uno dei possibili strumenti per la realizzazione di modelli matematici ad eventi discreti.

Se il sistema reale è particolarmente complesso, il corrispondente modello matematico può essere a sua volta complesso da trattare. In tali casi è possibile realizzare dei modelli simulativi o modelli di simulazione.

Nel seguito del lavoro viene usato lo strumento delle reti di Petri p/t per la realizzazione di modelli di simulazione per lo studio di un sistema per l'azionamento elettrico dell'estensione e ritrazione del carrello di atterraggio.

Cap.3 Reti di Petri per la realizzazione di modelli per la simulazione delle integrazioni fra componenti di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici

Di seguito è presentato il procedimento messo a punto per lo sviluppo di modelli a reti di Petri P/T per simulare l'integrazione fra componenti di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici.

Nello specifico, è stato considerato il sistema per l'estensione e la ritrazione del carrello.

3.1 Considerazioni preliminari ed ipotesi semplificative relative alla costruzione delle reti

Al fine di riflettere la struttura a moduli del sistema fisico nei modelli da costruire, è stato considerato uno schema di principio rappresentante le unità isolatamente.

Ciò consente di :

- disporre di un modello generale che esuli da una particolare soluzione tecnologica;
- eventuali modifiche alla struttura del sistema fisico consentiranno di identificare più agevolmente il punto in cui i modelli corrispondenti andranno aggiornati o sostituiti.

Per poter ottenere modelli utili nella pratica, è stato seguito un approccio fondato sulla essenzialità.

E' stato pertanto considerato un sistema composto dai seguenti elementi:

- Un attuatore per eseguire estensione e ritrazione. Di seguito denominato sinteticamente con l'acronimo ERA (Extension and Retraction Actuator), di tipo rotativo. Utilizzato sia durante la fase di estensione che durante la fase di ritrazione del carrello.
- Un attuatore per eseguire blocco e sblocco del carrello. Di seguito denominato sinteticamente con l'acronimo UDLA (Up and Down Lock Actuator), di tipo lineare.
- Sensori per rallentare gli attuatori. Di seguito denominati sinteticamente con l'acronimo SS (Soft Stop).
- Sensori per rilevare finecorsa. Nel seguito denominati sinteticamente con l'acronimo EoS (End of Stroke). Utilizzati per arrestare gli attuatori.
- Un interruttore di blocco up. Nel seguito denominato sinteticamente con l'etichetta UpLock, per rilevare il blocco del carrello in posizione Up.

- Un interruttore di blocco down. Nel seguito denominato sinteticamente con l'etichetta DownLock, per rilevare il blocco del carrello in posizione Down.
- Unità di coordinamento. Utilizzata per coordinare le attività del sistema.

In relazione alla attività di estensione e ritrazione, l'unità di controllo coordina le attività degli attuatori coinvolti per eseguire estensione e ritrazione dei carrelli sulla base delle informazioni rilevate dai sensori e dagli interruttori presenti nel sistema.

3.2 Considerazioni sul processo di costruzione dei modelli

La struttura modulare del sistema è stata riflessa nella costruzione dei modelli nel modo di seguito esposto.

Per ciascun componente, viene realizzato un modello a rete di Petri P/T che simula il comportamento del componente isolato.

Attraverso un opportuno processo di sintesi, vengono poi realizzati i modelli per simulare le integrazioni fra componenti.

Nella realizzazione dei modelli, sia per i componenti isolati che per le integrazioni, sono state utilizzate le considerazioni ricavate dai risultati di prove sperimentali condotte su un mockup in scala di un carrello di atterraggio di un velivolo leggero elettricamente attuato con un motore elettrico brushless.

3.3 Procedimento per la realizzazione delle reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico dei componenti isolati

Per poter realizzare dei modelli utili nella pratica e che possono consentire di operare anche in presenza di informazioni limitate, il procedimento parte dalla identificazione degli aspetti del comportamento del componente ritenuti essenziali per la trattazione.

Ciò permette di stabilire l'insieme dei posti e delle transizioni della rete.

L'individuazione dell'ordine di accadimento degli eventi che determinano le transizioni fra gli stati consente di realizzare una rete di partenza. Essa, relativamente al comportamento dinamico, è da considerare affetta da errore nella maggioranza dei casi.

Per affinarla, al fine di realizzare una rete che possa rappresentare il comportamento dinamico atteso dal componente, viene stabilita una marcatura iniziale. Essa rappresenta il riferimento rispetto al quale ruoterà il processo di affinamento.

L'osservazione del grafo di raggiungibilità ottenuto consente di ricavare la semantica associata alla rete marcata. Da tale analisi possono, di volta in volta, essere estratte le considerazioni mediante le quali progettare le modifiche alla rete i -esima al fine di cercare di ottenere una rete marcata la cui evoluzione dinamica consenta di rappresentare la semantica attesa.

Su queste basi è stato messo a punto il seguente algoritmo utilizzato per la costruzione dei modelli di simulazione a reti dei Petri P/T dei componenti isolati.

3.3.1 Algoritmo per la realizzazione dei modelli di simulazione a reti di Petri P/T del comportamento dei componenti isolati

Per ogni singolo componente, a partire dalle informazioni disponibili:

1. Individuare le condizioni ritenute essenziali per la descrizione del comportamento
2. Individuare le transizioni
3. Creare una PN iniziale
4. A partire da una marcatura iniziale, M_0 , generare il grafo di raggiungibilità ($GR(M_0)$)
5. Esaminare il $GR(M_0)$
6. Correggere la PN per rimuovere deviazioni del comportamento indesiderate
7. Generare un nuovo $GR(M_0)$
8. Se, esaminando il $GR(M_0)$, il modello ottenuto soddisfa i requisiti fine altrimenti si torni al passo 6.

Considerazioni sulla costruzione dei modelli mediante i passi dell'algoritmo

La realizzazione dei modelli per la simulazione del comportamento dei componenti isolati rappresenta il punto di partenza per la costruzione di modelli successivi in cui il livello di integrazione fra le parti tenderà ad aumentare la complessità delle reti corrispondenti.

Di conseguenza, il requisito della identificazione dei soli aspetti ritenuti essenziali per la descrizione del comportamento è importante.

E' indubbio che più informazioni si trasferiscono nel modello più questi rappresenta il sistema fisico. Ma il rischio cui ci si espone è che la complessità del modello che ne deriva è tale da rendere la trattazione difficile.

L'approccio che si vuol seguire con questo lavoro è invece di realizzare dei modelli che abbiano un livello di complessità relativo.

3.4 Procedimento per la realizzazione delle reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico a seguito di integrazione fra componenti

Una volta realizzati i modelli a rete di Petri che simulano il comportamento dei componenti isolati, è possibile passare ad una loro composizione al fine di realizzare modelli che rappresentino l'evoluzione dinamica condizionata dalla integrazione fra parti.

Il processo di costruzione seguito rappresenta una generalizzazione di quello utilizzato nella realizzazione delle reti che modellano il comportamento delle parti isolate.

In particolare, a partire dai modelli delle componenti isolate, occorre realizzare una rete iniziale che rappresenti il comportamento atteso dalla integrazione.

Come prima, la rete in questione, relativamente al comportamento dinamico, è da considerare affetta da errore.

Stabilita una marcatura iniziale, può essere avviato il processo di affinamento che ha quale obiettivo la realizzazione di una rete in grado di rappresentare il comportamento dinamico atteso dalla integrazione fra le parti coinvolte.

In particolare, l'osservazione della semantica emergente dal grafo di raggiungibilità corrispondente alla rete marcata rappresenta il riferimento rispetto al quale apportare modifiche alla rete.

Il procedimento può essere ripetuto fino al raggiungimento del livello di soddisfacimento desiderato.

Una modifica all'algoritmo messo a punto per la costruzione dei modelli di simulazione per componenti isolati ha consentito di ottenere i passi del seguente algoritmo usato per la realizzazione dei modelli di simulazione della integrazione fra componenti.

3.4.1 Algoritmo modificato per la realizzazione dei modelli di simulazione a rete di Petri P/T del comportamento dei componenti a seguito di integrazione

A partire dai modelli di simulazione precedentemente realizzati :

1. Individuare i modelli dei componenti da integrare
2. Individuare condizioni ritenute essenziali per la descrizione del comportamento integrato

3. Individuare transizioni
4. Creare una PN integrata iniziale
5. A partire da una marcatura iniziale, M_0 , generare grafo di raggiungibilità ($GR(M_0)$)
6. Esaminare $GR(M_0)$
7. Correggere PN per rimuovere deviazioni indesiderate
8. Generare nuovo $GR(M_0)$
9. Se il modello soddisfa i requisiti fine altrimenti si torni al passo 6.

Considerazioni sulla costruzione dei modelli mediante i passi dell'algoritmo

I modelli ottenibili sono da considerare un affinamento dei modelli di simulazione dei componenti isolati. Durante lo sviluppo è difatti possibile, se ritenuto opportuno, arricchire i modelli con ulteriori informazioni.

Si è cercato in tal modo di sviluppare modelli di simulazione che procedessero per miglioramenti successivi.

Cap.4 Modelli a rete di Petri P/T per la simulazione del comportamento dinamico dei componenti isolati

Verranno di seguito mostrati i modelli matematici a rete di Petri P/T relativi ad alcuni dei componenti di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici. I modelli si riferiscono alle reti di Petri P/T realizzate attraverso i passi dell'algoritmo precedentemente esposto per la realizzazione dei modelli di simulazione a reti di Petri P/T di componenti isolati.

Nel caso del modello per sensore / interruttore a due stati, si può osservare l'ottenimento del noto modello a rete di Petri dell'interruttore.

Verranno illustrate le reti, la semantica associata a ciascun modello e l'evoluzione di stato a partire da una determinata marcatura iniziale.

4.1 Modello di simulazione a rete di Petri P/T dell'attuatore di estensione e ritrazione (ERA)

L'attuatore cui si farà riferimento viene utilizzato attivamente sia durante l'estensione che durante la ritrazione del carrello.

Il modello base realizzato per simulare il comportamento dell'attuatore ERA è rappresentato dalla struttura:

$$N_{ERA} = (P_{ERA}, T_{ERA}, Pre_{ERA}, Post_{ERA})$$

dove:

- $P_{ERA} = \{p_i\}_{i \in (1..14)}$
- $T_{ERA} = \{t_i\}_{i \in (1..15)}$

$$\bullet \quad Pre_{ERA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad Post_{ERA} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Come è possibile notare, le matrici sono di tipo sparso. Ciò è dovuto alla realizzazione della rete in modo da considerare solo aspetti ritenuti essenziali per la trattazione.

Più complessa è la rete, più le matrici diventano piene.

Nella figura che segue è fornita la rappresentazione grafica della rete con l'aggiunta di etichette ai posti per evidenziare il contributo informativo.

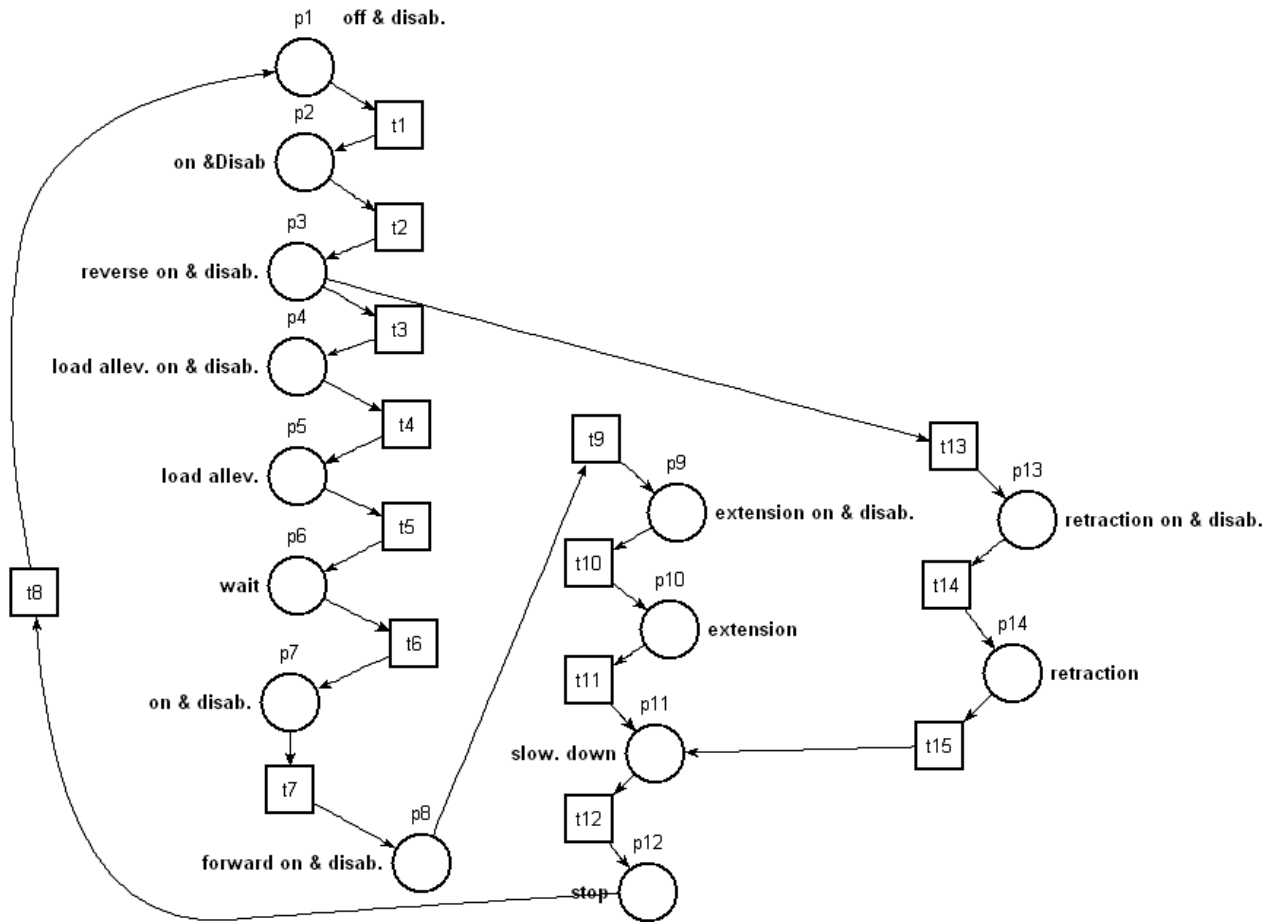


Figura 9: Rete di Petri dell'attuatore ERA progettata secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati

4.1.1 Semantica della rete marcata

La struttura della rete evidenzia la presenza di due sequenze non simmetriche.

In particolare, viene modellata una sequenza per l'attività in estensione ed un'altra per quella in ritrazione.

La sequenza che modella l'attività in estensione include una pre-fase di alleggerimento del peso. Questa pre-fase, qualora non prevista, può essere facilmente rimossa modificando la rete con un opportuno arco di bypass. Di conseguenza, non viene persa generalità nella modellazione.

Di seguito viene riportata la rete nella marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$.

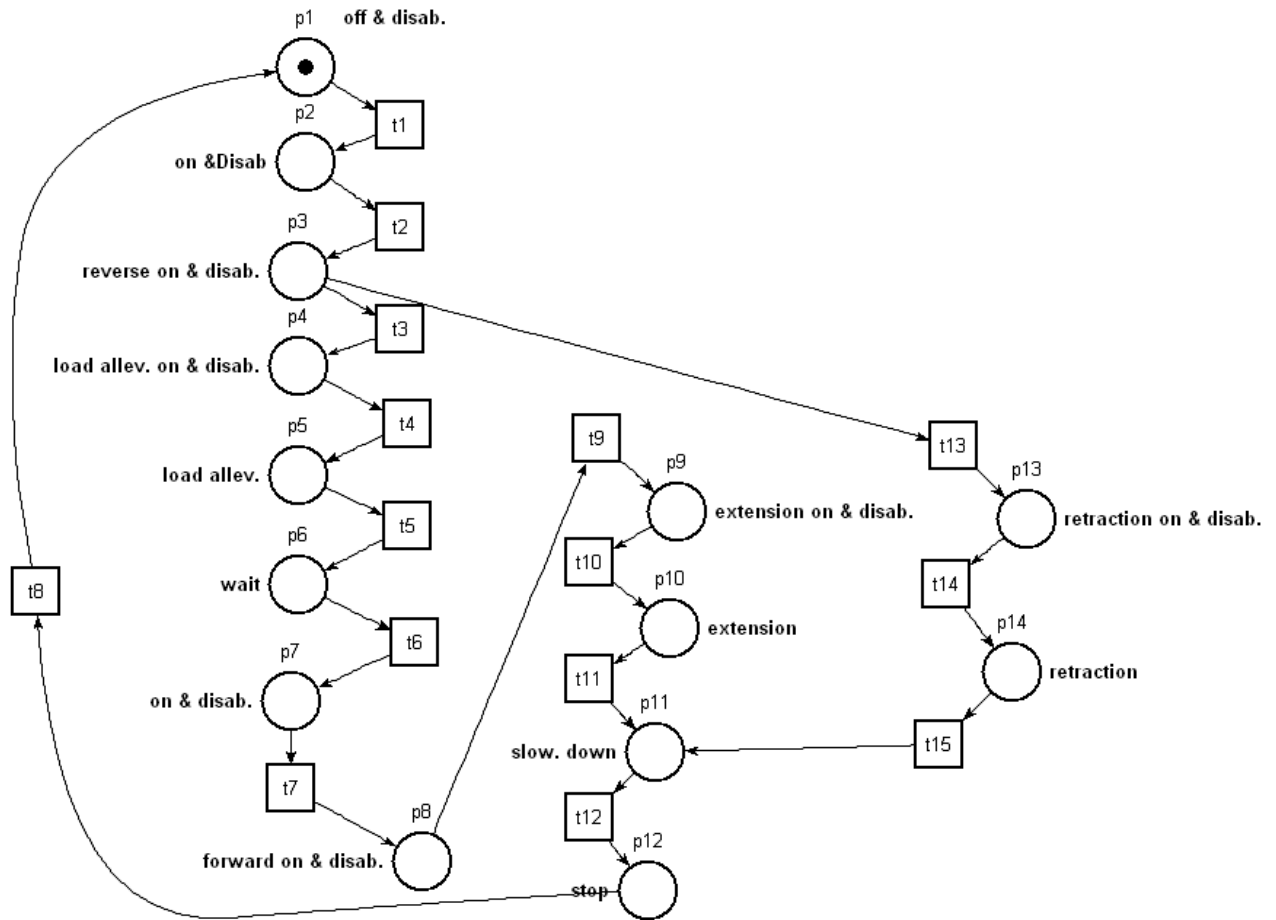


Figura 10: Rete di Petri dell'attuatore ERA progettata secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati nella marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ (1 token sul posto p_1)

Con riferimento alla figura, l'attuatore in esame, a partire dalla marcatura $M_0 = [p_1]^T$ in cui viene assunto spento e disabilitato, viene opportunamente impostato per poter svolgere la sua attività differenziando fra estensione e ritrazione.

Per l'estensione, è prevista una fase di sollevamento e subito dopo una fase di attesa prima dell'avvio della attività in estensione vera e propria.

La fase di attesa rappresenta la condizione in cui l'attuatore attende lo sblocco del carrello per avviare l'estensione.

Per evitare arresti bruschi, sia durante l'attività in estensione che durante quella in ritrazione, sono previste condizioni in cui l'attuatore viene prima rallentato e poi fermato.

Una volta che esso ha completato l'attività richiesta, viene riportato nello stato iniziale.

La diversificazione del comportamento dell'attuatore per l'estensione e la ritrazione è stata scelta per poter eventualmente, attraverso il modello, identificare possibili situazioni di blocco dell'attuatore causate da impostazioni non corrette.

Prove condotte in laboratorio su un mockup sperimentale basato su un motore elettrico brushless, hanno infatti fatto rilevare che un errore nella inversione del senso di rotazione del motore induceva l'attuatore in blocco in assenza di guasto.

4.1.2 Evoluzione di stato della rete

Il comportamento della rete $\langle N_{ERA}, M_0 \rangle$ a partire dalla marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ è rappresentato dunque da:

$$L(N_{ERA}, M_0) = \{\sigma \in T^*_{ERA} \mid M_0[\sigma > \}.$$

L'insieme delle marcature raggiungibili dal modello, a partire da $M_0 = [p_1]^T$, è dato dall'insieme:

$$RS(N_{ERA}, M_0) = \{M_i\}_{i \in 0..13}$$

dove:

$M_0^T =$	p_1
$M_1^T =$	p_2
$M_2^T =$	p_3
$M_3^T =$	p_{13}
$M_4^T =$	p_4
$M_5^T =$	p_{14}
$M_6^T =$	p_5
$M_7^T =$	p_{11}
$M_8^T =$	p_6
$M_9^T =$	p_{12}
$M_{10}^T =$	p_7

$M_{11}^T =$	p_8
$M_{12}^T =$	p_9
$M_{13}^T =$	p_{10}

Figura 11: insieme di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_{ERA}, M_0 \rangle$

Il grafo di raggiungibilità a partire dalla marcatura iniziale in oggetto è di seguito riportato.

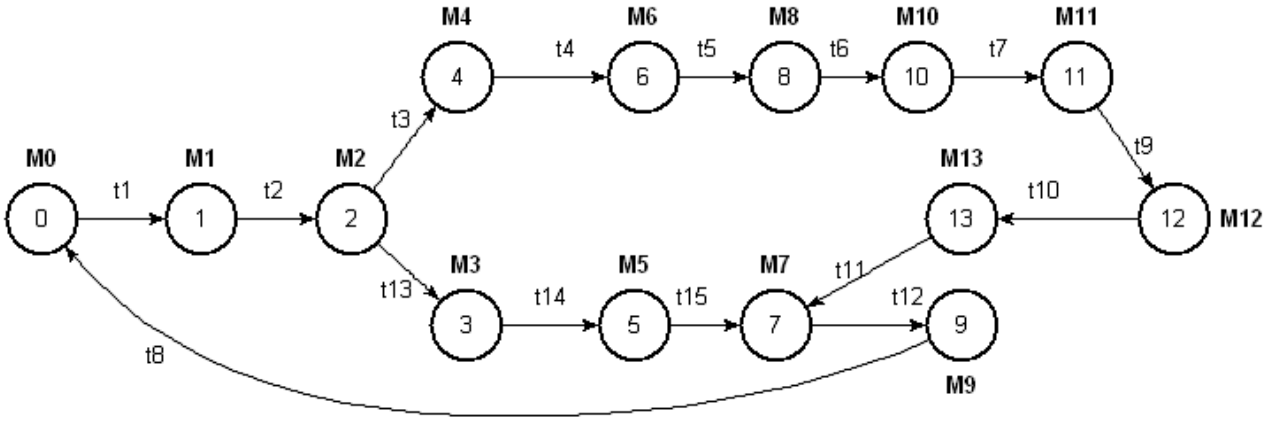


Figura 12: grafo di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_{ERA}, M_0 \rangle$

A partire dalla marcatura iniziale $M_0 = p_1^T$ otteniamo dunque la seguente traiettoria per l'attività in estensione:

$$\begin{aligned}
 M_0[t_1 > M_1[t_2 > M_2[t_3 > M_4[t_4 > M_6[t_5 > M_8[t_6 > M_{10}[t_7 > M_{11}[t_9 \\
 > M_{12}[t_{10} > M_{13}[t_{11} > M_7[t_{12} > M_9[t_8 > M_0
 \end{aligned}$$

E la seguente traiettoria per quella in ritrazione:

$$M_0[t_1 > M_1[t_2 > M_2[t_{13} > M_3[t_{14} > M_5[t_{15} > M_7[t_{12} > M_9[t_8 > M_0$$

E' possibile notare assenza di deadlocks. Ciò rappresenta una evoluzione del comportamento del componente che non evidenzia alcuno stato in cui l'attuatore non sia in grado di espletare la funzione richiesta.

E' inoltre evidente la proprietà di reversibilità che rappresenta il ritorno del componente nello stato iniziale dopo l'espletamento della funzione richiesta.

4.2 Modello di simulazione a rete di Petri P/T dell'attuatore di blocco up/down (UDLA)

L'attuatore cui ci si riferisce nel modello è di tipo attivo solo per lo sblocco del carrello. Per il blocco esso è utilizzato in modo passivo.

In particolare, esso consente di effettuare il blocco del carrello sfruttando l'energia accumulata durante la fase in cui è azionato rapidamente per sbloccare il carrello.

Il modello base realizzato per simulare il comportamento dell'attuatore UDLA è rappresentato dalla struttura :

$$N_{UDLA} = (P_{UDLA}, T_{UDLA}, Pre_{UDLA}, Post_{UDLA})$$

dove:

- $P_{UDLA} = \{p_i\}_{i \in (1..7)}$

- $T_{UDLA} = \{t_i\}_{i \in (1..7)}$

- $Pre_{UDLA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- $Post_{UDLA} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Di seguito è fornita la rappresentazione grafica della rete con l'aggiunta di etichette ai posti per evidenziare il contributo informativo.

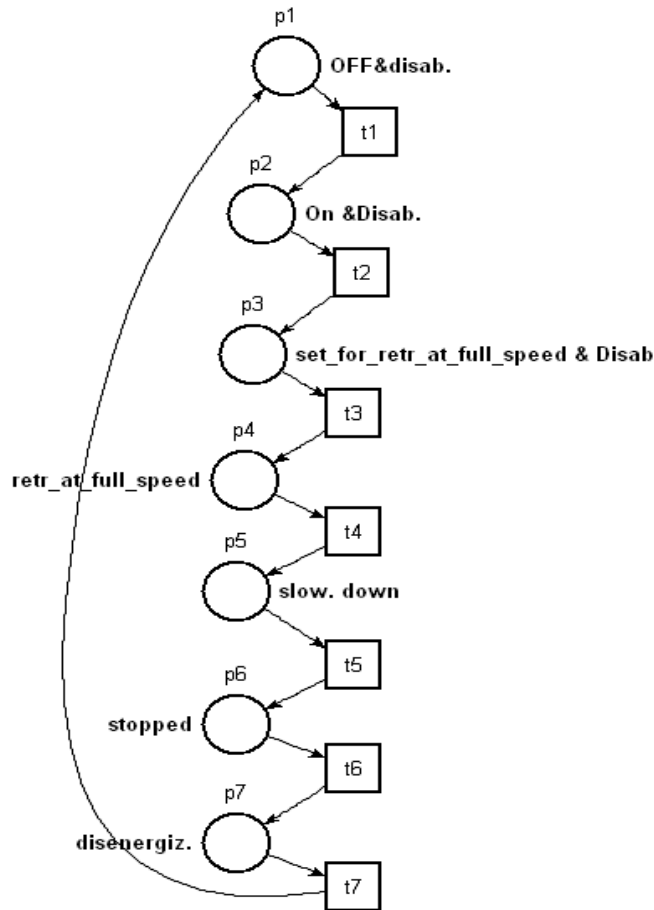


Figura 13: Rete di Petri dell'attuatore UDLA progettata secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati

4.2.1 Semantica della rete marcata

La struttura della rete evidenzia un comportamento di natura sequenziale e reversibile.

Di seguito viene riportata la rete nella marcatura $M_0 = [p_1]^T$ (un token sul posto p_1).

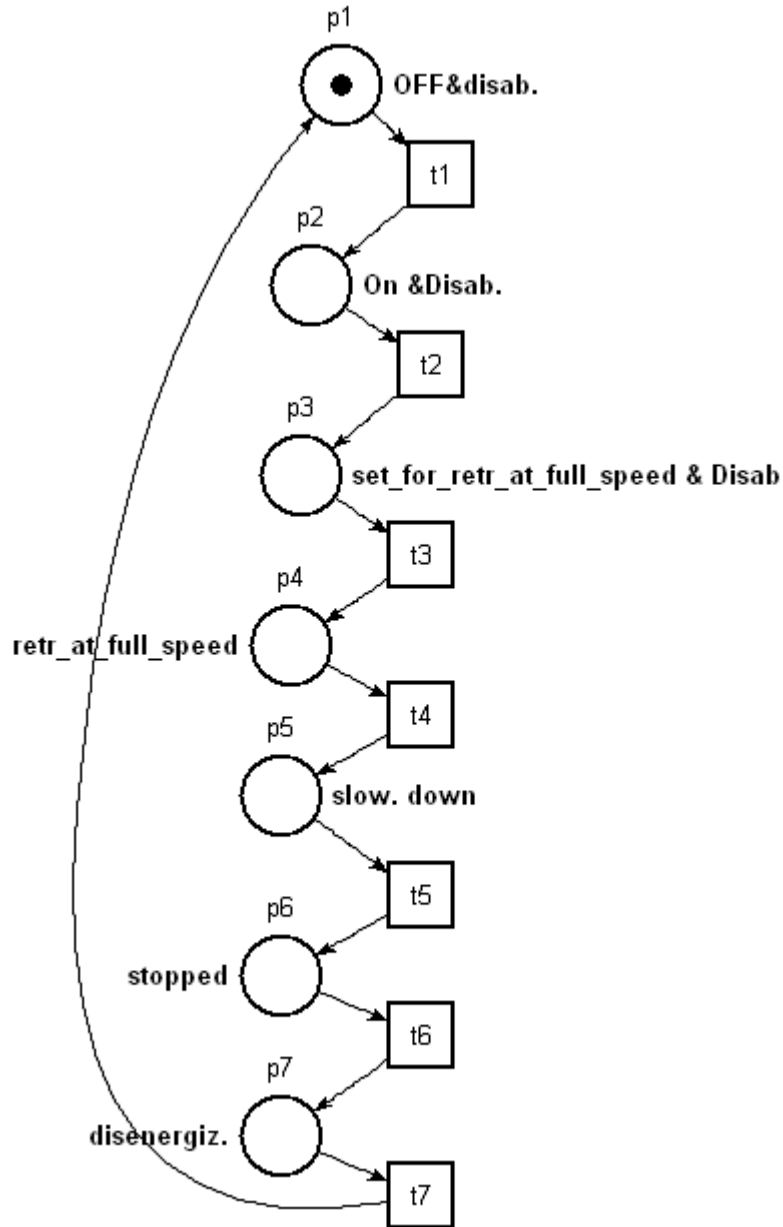


Figura 14: Rete di Petri dell'attuatore UDLA progettata secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati nella marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ (1 token sul posto p_1)

Come si vede dalla figura, l'attuatore, a partire dalla marcatura $M_0 = [p_1]^T$, in cui viene assunto spento e disabilitato, viene fatto ritrarre alla massima velocità al fine di realizzare l'attività di sbloccaggio.

Per evitare un brusco arresto, viene rallentato dopodiché viene fermato e tenuto in posizione.

La successiva condizione di diseccitazione consente di rappresentare l'utilizzo dell'attuatore in modo passivo per eseguire attività di bloccaggio.

Una volta completata la sua funzione, l'attuatore ritorna nello stato di partenza.

4.2.2 Evoluzione di stato della rete

Il comportamento della rete $\langle N_{UDLA}, M_0 \rangle$ a partire dalla marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ è rappresentato dunque da:

$$L(N_{UDLA}, M_0) = \{\sigma \in T^*_{UDLA} \mid M_0[\sigma > \}$$

L'insieme delle marcature raggiungibili a partire da $M_0 = [p_1]^T$ è dato dall'insieme:

$$RS(N_{UDLA}, M_0) = \{M_i\}_{i \in 0..6}$$

dove:

$M_0^T =$	p_1
$M_1^T =$	p_2
$M_2^T =$	p_3
$M_3^T =$	p_4
$M_4^T =$	p_5
$M_5^T =$	p_6
$M_6^T =$	p_7

Figura 15: insieme di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_{UDLA}, M_0 \rangle$

Il grafo di raggiungibilità a partire dalla marcatura iniziale in oggetto è di seguito riportato.

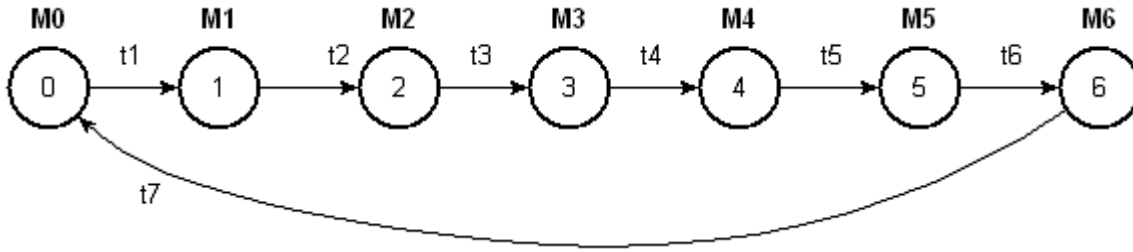


Figura 16: grafo di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_{UDLA}, M_0 \rangle$

A partire dalla marcatura iniziale $M_0 = p_1^T$ otteniamo dunque la seguente traiettoria:

$$M_0[t_1 > M_1[t_2 > M_2[t_3 > M_3[t_4 > M_4[t_5 > M_5[t_6 > M_6[t_7 > M_0$$

che rappresenta, a partire dallo stato iniziale, l'attività di sblocco e blocco eseguita in sequenza dall'attuatore.

Anche per questa rete è possibile osservare assenza di deadlocks e comportamento reversibile.

4.3 Modello di simulazione a rete di Petri P/T di sensore /interruttore a due stati

Il modello base realizzato per simulare il comportamento di un sensore od un interruttore a due stati è rappresentato dalla struttura:

$$N_s = (P_s, T_s, Pre_s, Post_s)$$

dove:

- $P_s = \{p_i\}_{i \in (1..2)}$
- $T_s = \{t_i\}_{i \in (1..2)}$

- $Pre_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $Post_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Di seguito è riportata la rappresentazione grafica della rete con aggiunta di etichette ai posti per trasmettere il contenuto informativo associato alla struttura.

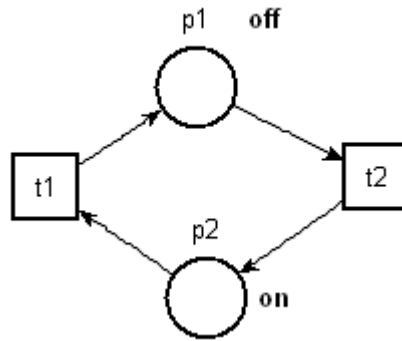


Figura 17: modello a rete di Petri sensore/interruttore a due stati

Come detto, è la nota rappresentazione a rete di Petri P/T di un interruttore.

4.3.1 Semantica della rete marcata

La struttura della rete rappresenta una evoluzione ciclica del comportamento del componente isolato.

Per esaminare la semantica associata, viene di seguito riportata la rete nella marcatura $M_0 = [p_1]^T$.

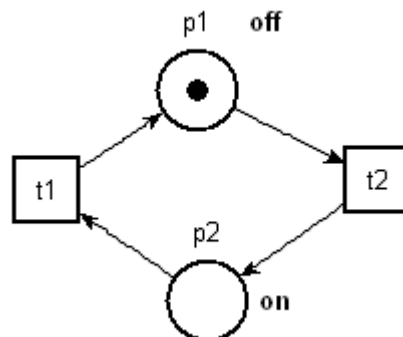


Figura 18: modello a rete di Petri sensore/interruttore a due stati nella marcatura iniziale

$$M_0 = [p_1]^T \text{ (un token sul posto } p_1 \text{)}$$

Con riferimento alla figura, il componente può passare da uno stato off ad uno stato on al verificarsi degli opportuni eventi.

4.3.2 Evoluzione di stato della rete

Il comportamento della rete $\langle N_S, M_0 \rangle$ a partire dalla marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ è rappresentato dall'insieme :

$$L(N_S, M_0) = \{\sigma \in T_S^* \mid M_0[\sigma > \}$$

L'insieme delle marcature raggiungibili a partire da $M_0 = [p_1]^T$ è dato da:

$$RS(N_S, M_0) = \{M_i\}_{i \in 0..1}$$

dove:

$M_0^T = p_1$
$M_1^T = p_2$

Figura 19: insieme di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_S, M_0 \rangle$

Il grafo di raggiungibilità a partire dalla marcatura iniziale in oggetto è di seguito riportato.

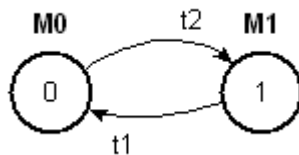


Figura 20: grafo di raggiungibilità della rete marcata $\langle N_S, M_0 \rangle$

A partire dalla marcatura iniziale $M_0 = [p_1]^T$ otteniamo dunque la seguente traiettoria:

$$M_0[t_2 > M_1[t_1 > M_0$$

che rappresenta l'evoluzione dello stato off \rightarrow on \rightarrow off.

Osservazione sulla rappresentazione dei grafi di raggiungibilità

Le etichette poste sui nodi del grafo di raggiungibilità benché ridondanti, sono state inserite al solo scopo di favorire la corrispondenza fra le notazioni usate nelle tabelle riportanti gli insiemi di raggiungibilità ed le rappresentazioni dei grafi.

Nel seguito del lavoro tale ridondanza verrà rimossa eliminando le etichette dai nodi dei grafi di raggiungibilità.

Cap. 5 Modelli a reti di Petri P/T per la simulazione del comportamento dei componenti a seguito di integrazione

Verranno di seguito mostrati i modelli a rete di Petri P/T per la simulazione della integrazione fra alcuni dei componenti di un sistema per l'azionamento di carrelli di atterraggio basato su motori elettrici.

Nel capitolo precedente, per ciascuna rete, è stato presentato sia il formalismo analitico che quello grafico.

L'integrazione fra i modelli accrescendo la complessità del modello, avrà un diretto impatto sulle matrici rappresentative delle strutture.

Dal momento che, come mostrato, esiste una precisa corrispondenza fra formalismo grafico e strutture analitiche, per poter fornire un miglior contributo informativo alla trattazione, si procederà utilizzando il solo formalismo grafico.

Questa è anche la ragione per la quale per rappresentare matematicamente le reti non si è fatto ricorso alla matrice di incidenza.

I modelli si riferiscono alle reti di Petri P/T realizzate attraverso i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione dei modelli di simulazione a reti di Petri P/T del comportamento dei componenti a seguito di integrazione.

Pertanto, verranno presentate prima le reti di base, ovvero quelle corrispondenti ai modelli di simulazione del comportamento dei componenti isolati. Poi, verranno illustrate le reti iniziali, progettate per l'avvio del processo di affinamento e le reti finali.

Per ogni rete, sarà mostrato il grafo di raggiungibilità, attraverso il quale osservare l'evoluzione di stato a seguito della integrazione, e l'insieme di raggiungibilità mediante il quale osservare le marcature in cui il sottosistema, costituito dai componenti integrati, può trovarsi a partire dalla marcatura iniziale evidenziata.

Nel caso dell'ultimo modello, viene presentata anche una rete intermedia. Attraverso tale esempio, è possibile osservare un modello che è relativamente corretto, come si avrà modo di evidenziare.

5.1 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore di soft stop

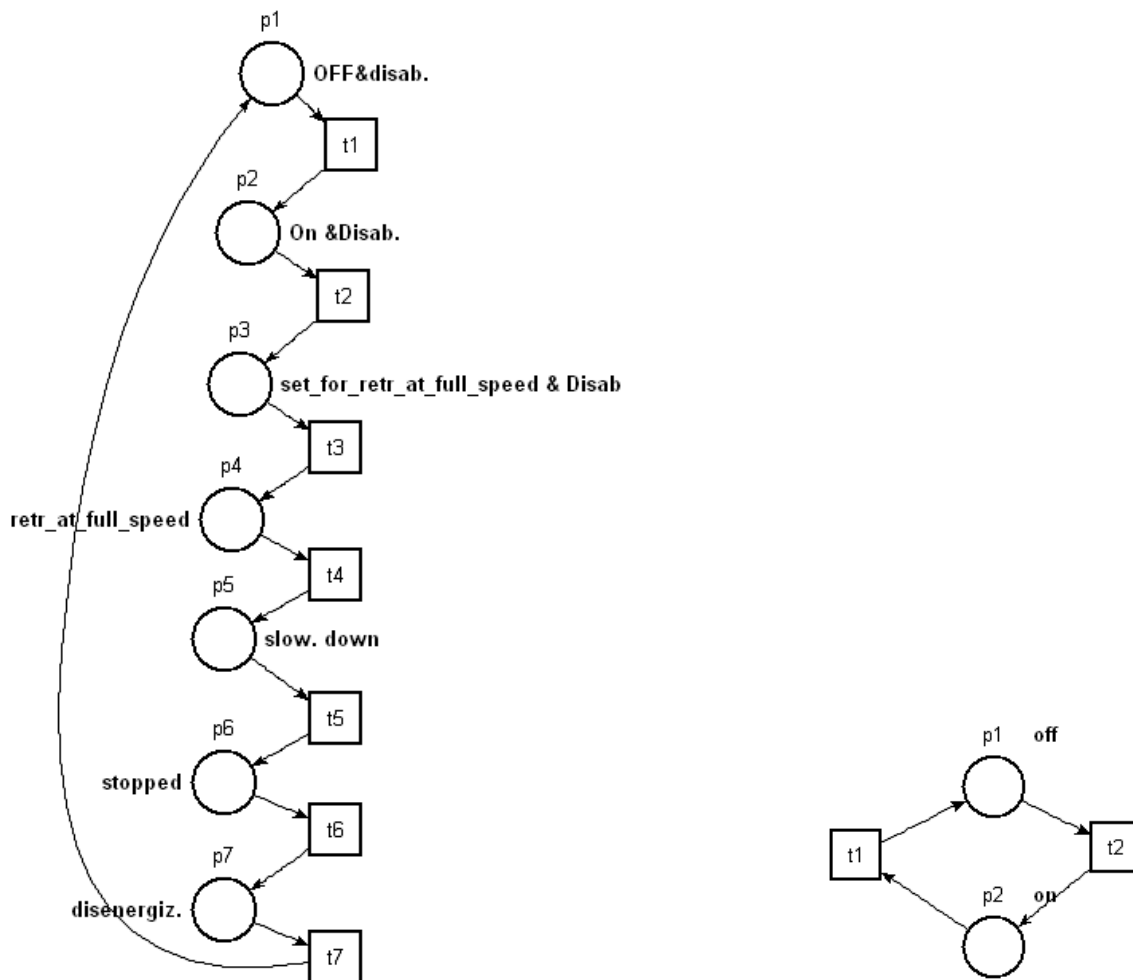


Figura 21: PN dell'attuatore UDLA isolato e PN di sensore isolato progettate secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati.

Rappresentano le reti di base da cui si è partiti per realizzare una PN iniziale che intende simulare il processo di integrazione fra attuatore UDLA e sensore di soft stop fully retracted. Con questa terminologia ci si è riferiti al sensore utilizzato per rallentare l'attuatore quando questi sta svolgendo la sua attività di sblocco.

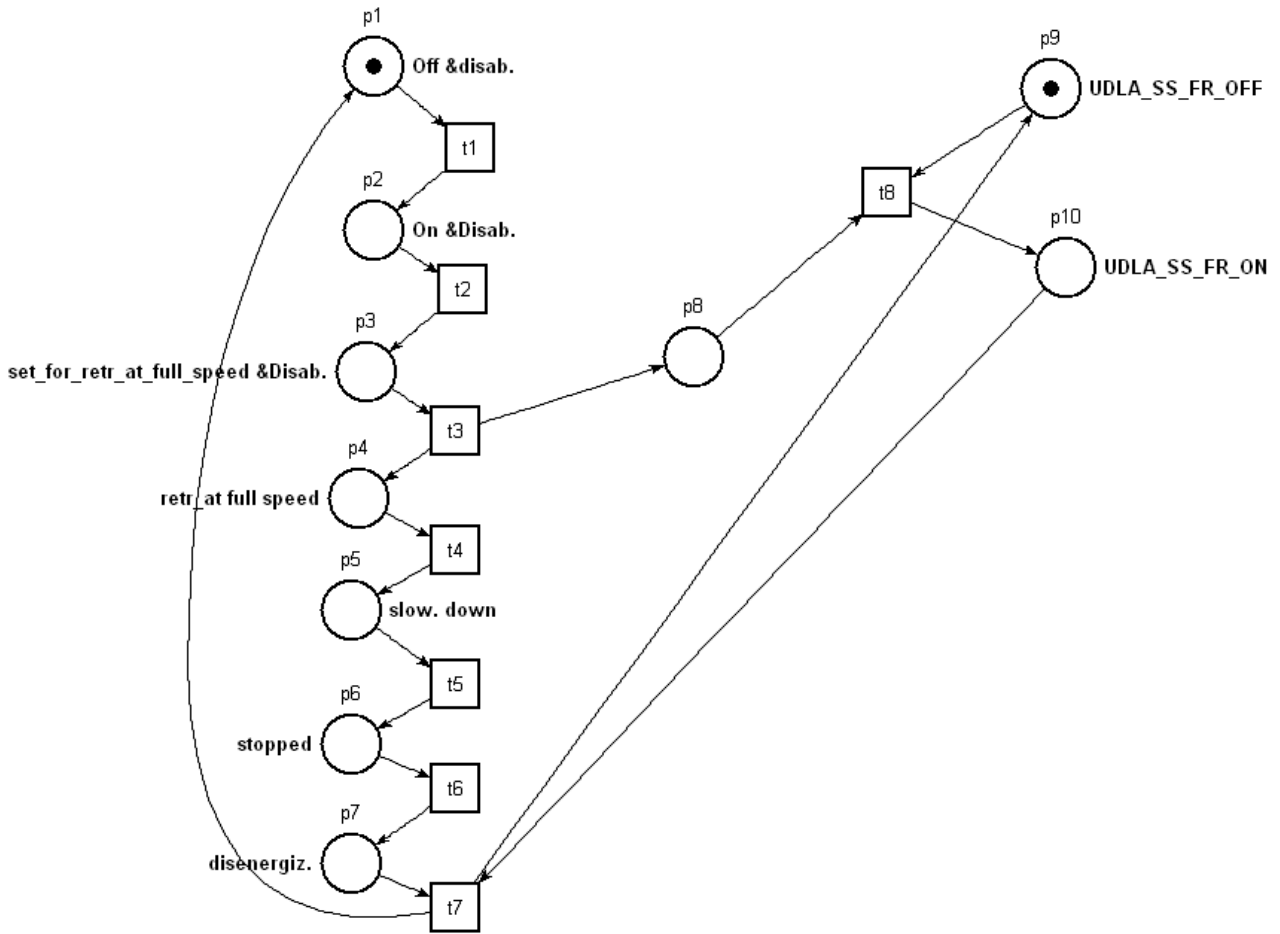


Figura 22: PN iniziale per il modello di integrazione UDLA-sensore di soft stop fully retracted, progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione.

La rete è osservata nella marcatura $M_0 = p_1 + p_9$ (un token sul posto p_1 ed uno sul posto p_9) corrispondente alla condizione di attuatore spento e disabilitato e sensore nello stato off.

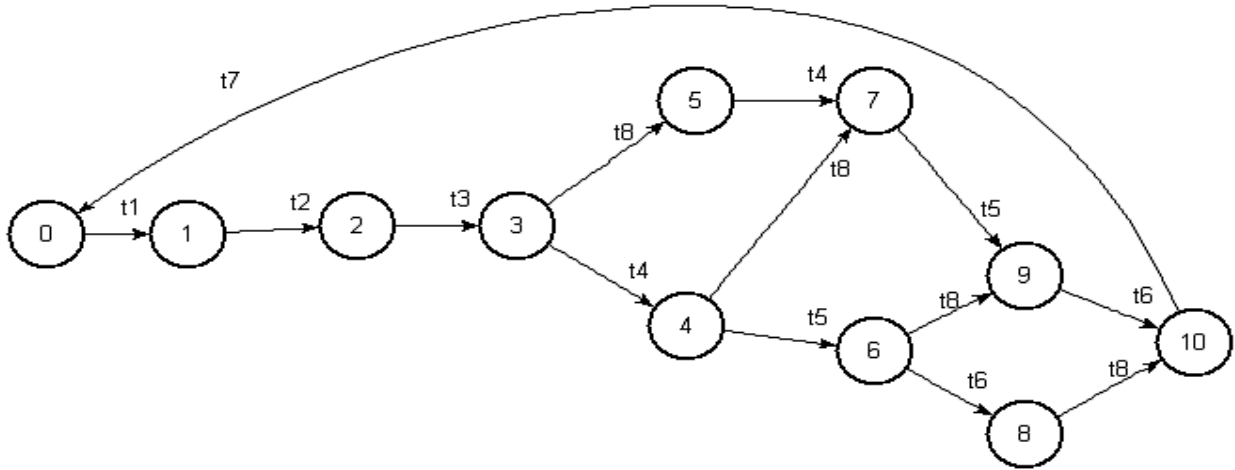


Figura 23: Grafo di raggiungibilità della rete marcata da cui si evince una biforcazione indesiderata a partire dalla marcatura M_3 . La traiettoria originata dallo sparo di t_4 mostra l'avanzamento dell'attuatore senza il condizionamento del sensore. Ciò è il prodotto dell'errore di modellazione iniziale.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_8 + p_9$
$M_4^T =$	p_5	$+ p_8 + p_9$
$M_5^T =$	p_4	$+ p_{10}$
$M_6^T =$	p_6	$+ p_8 + p_9$
$M_7^T =$	p_5	$+ p_{10}$
$M_8^T =$	p_7	$+ p_8 + p_9$
$M_9^T =$	p_6	$+ p_{10}$
$M_{10}^T =$	p_7	$+ p_{10}$

Figura 24: Insieme di raggiungibilità della rete marcata iniziale da cui è possibile osservare le distribuzioni dei tokens sui posti a seconda dello stato in cui si trova la rete che simula l'integrazione fra i due componenti.

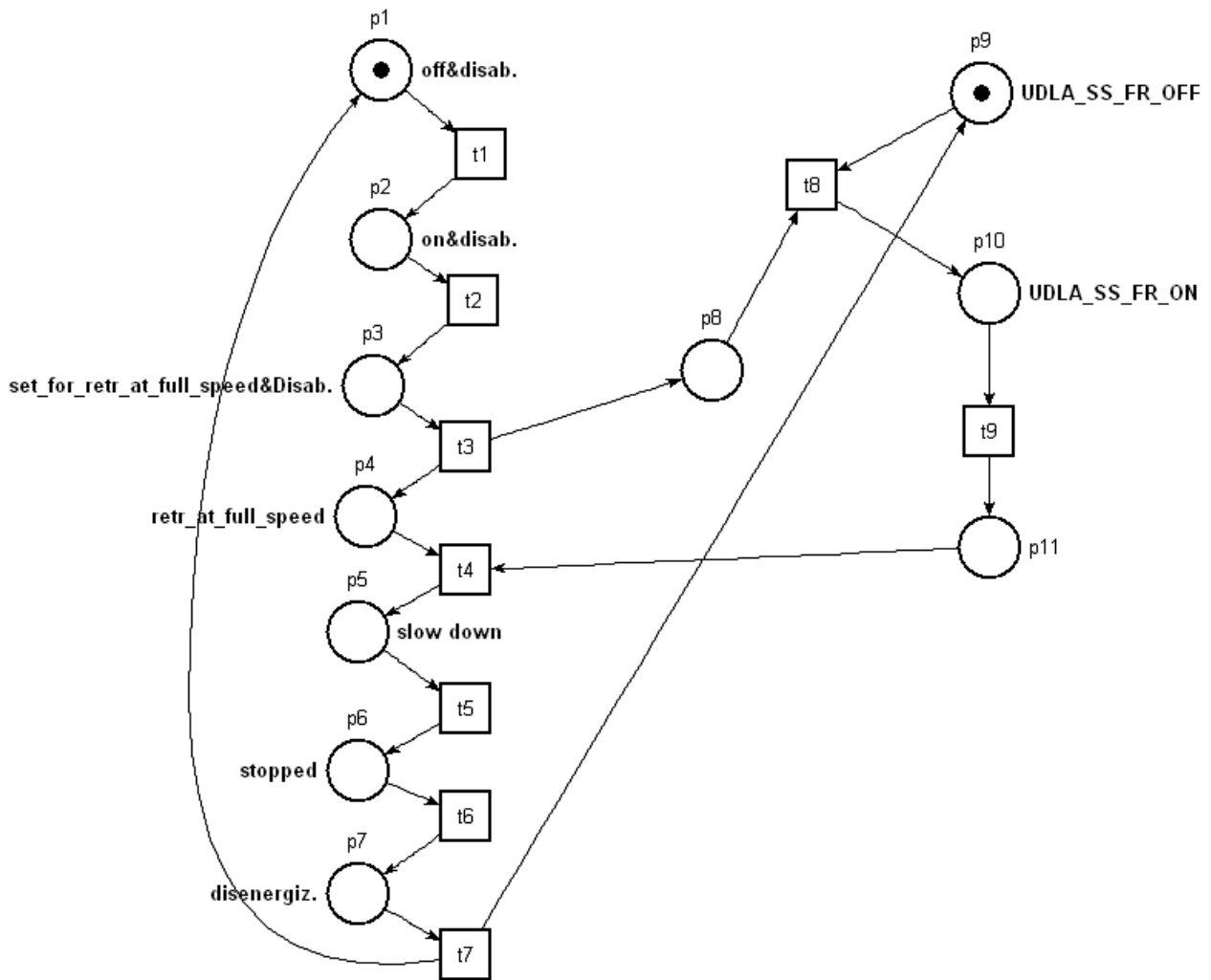


Figura 25: PN finale per la simulazione della integrazione fra UDLA e sensore di soft stop fully retracted, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9$, progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione.
La marcatura iniziale rappresenta lo stato del sistema in cui l'attuatore è spento e disabilitato ed il sensore per il rallentamento è off.

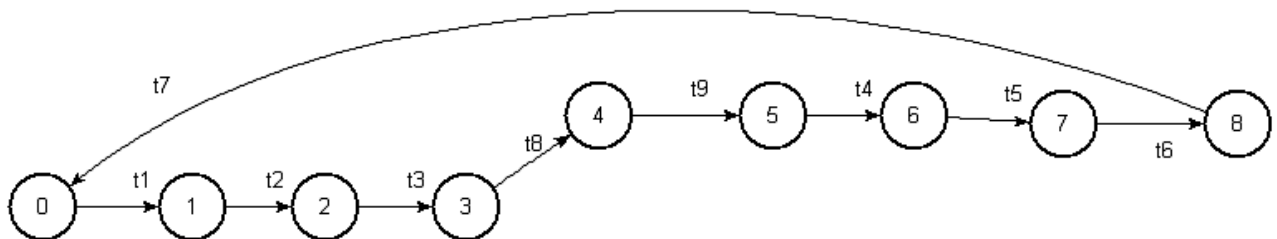


Figura 26: grafo di raggiungibilità della rete finale in cui si evidenzia la rimozione della biforcazione indesiderata.
Le modifiche apportate consentono alla rete progettata di simulare la corretta sequenza di integrazione fra i due componenti.
L'attuatore rallenta solo dopo che il sensore di rallentamento si è attivato.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_8 + p_9$
$M_4^T =$	p_4	$+ p_{10}$
$M_5^T =$	p_4	$+ p_{11}$
$M_6^T =$	p_5	
$M_7^T =$	p_6	
$M_8^T =$	p_7	

Figura 27: Insieme di raggiungibilità corrispondente alla rete finale, a partire dalla marcatura iniziale $M_0^T = p_1 + p_9$, da cui è possibile osservare le distribuzioni dei tokens sui vari posti a seconda dello stato in cui si trova la rete che simula l'integrazione fra i due componenti.

Osservazione sui grafi di raggiungibilità dei modelli ottenuti

A mano a mano che il modello si è affinato, si è osservato che il grafo di raggiungibilità del modello integrato si è conformato al grafo di raggiungibilità del modello che simula il comportamento atteso dell'attuatore UDLA.

5.2 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore end of stroke

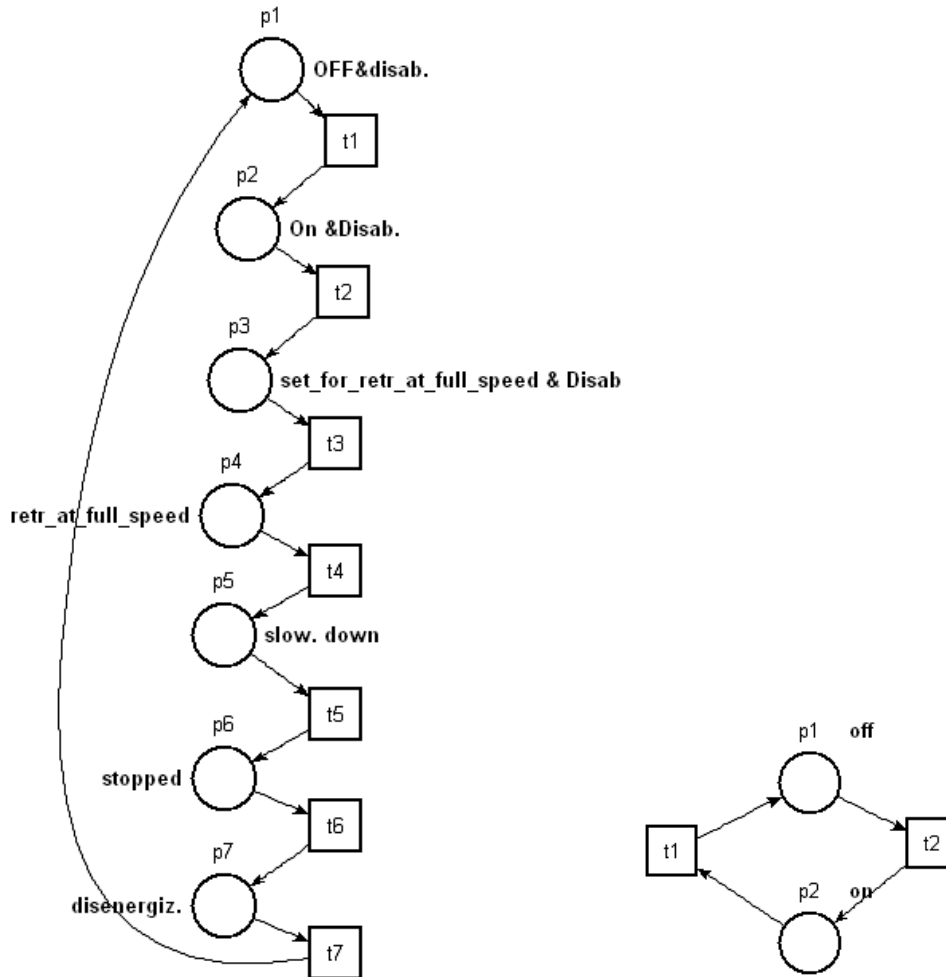


Figura 28: PN dell'attuatore UDLA isolato e PN di sensore isolato progettate secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati.

Rappresentano le reti di base da cui si è partiti per realizzare una PN iniziale che intende simulare il processo di integrazione fra attuatore UDLA e sensore di end of stroke fully retracted. Con tale terminologia ci si è riferiti al sensore utilizzato per arrestare l'attuatore quando questi sta svolgendo la sua attività di sblocco.

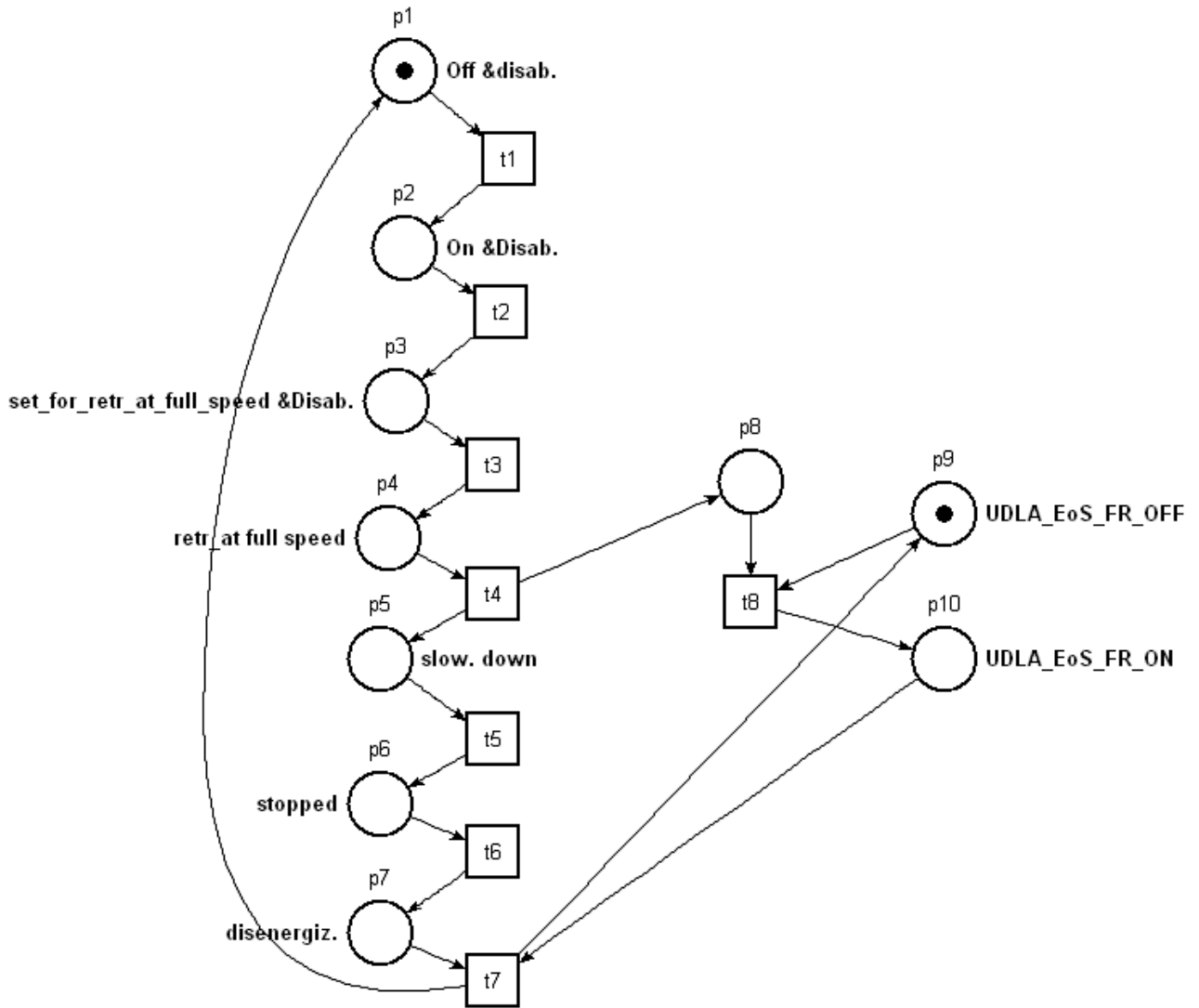


Figura 29: PN iniziale per il modello di integrazione UDLA-sensore di End of stroke fully retracted, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_9) progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato del sistema in cui l'attuatore è spento e disabilitato ed il sensore è off.

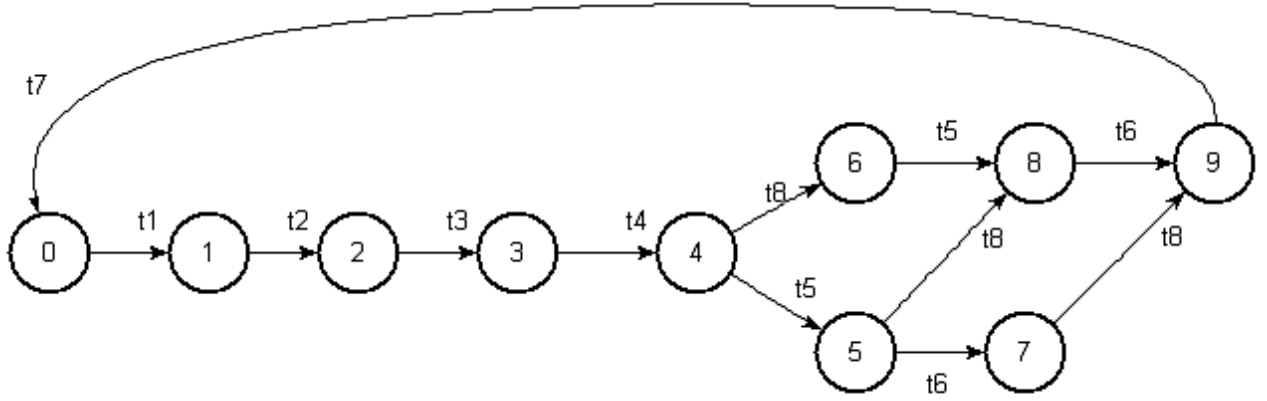


Figura 30: Grafo di raggiungibilità della rete marcata iniziale evidenziante una biforcazione indesiderata a partire dalla marcatura M_4 . La traiettoria generata dallo sparo di t_5 evidenzia il comportamento del sistema che vede l'attuatore proseguire la sua attività senza il condizionamento del sensore. Ciò è l'effetto dell'errore nel modello iniziale.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_9$
$M_4^T =$	p_5	$p_8 + p_9$
$M_5^T =$	p_6	$+ p_8 + p_9$
$M_6^T =$	p_5	$+ p_{10}$
$M_7^T =$	$p_7 + p_8 + p_9$	
$M_8^T =$	p_6	$+ p_{10}$
$M_9^T =$	p_7	$+ p_{10}$

Figura 31: Insieme di raggiungibilità corrispondente alla rete finale, a partire dalla marcatura iniziale $M_0^T = p_1 + p_9$, da cui è possibile osservare le distribuzioni dei tokens sui vari posti a seconda dello stato in cui si trova la rete che simula l'integrazione fra i due componenti.

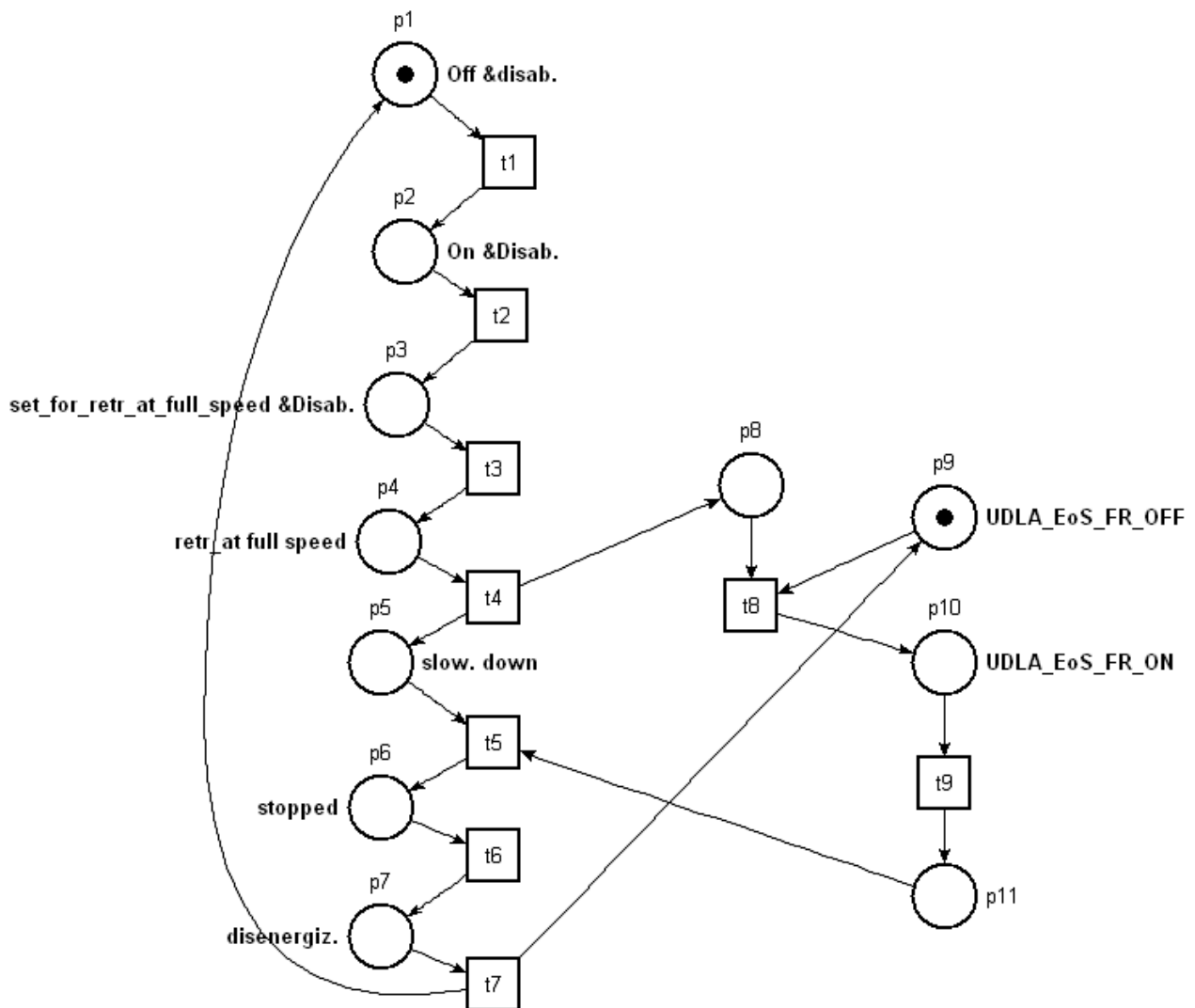


Figura 32:PN finale per la simulazione della integrazione fra UDLA e sensore di End of stroke fully retracted, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_9),progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed il sensore ad off.

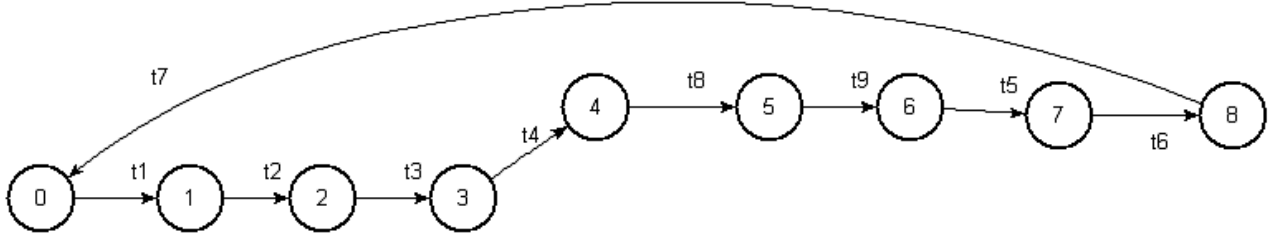


Figura 33: Grafo di raggiungibilità della rete marcata da cui si evince la rimozione della biforcazione indesiderata. La rete finale progettata rappresenta un modello di integrazione fra i due componenti che vede l’attuatore arrestarsi solo dopo l’attivazione del relativo sensore.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_9$
$M_4^T =$	p_5	$+ p_8 + p_9$
$M_5^T =$	p_5	$+ p_{10}$
$M_6^T =$	p_5	$+ p_{11}$
$M_7^T =$	p_6	
$M_8^T =$	p_7	

Figura 34: Insieme di raggiungibilità della rete finale marcata da cui è possibile osservare la distribuzione dei tokens sui posti a seconda dello stato in cui si trova la rete che simula l’integrazione fra i due componenti, a partire dalla marcatura iniziale.

Osservazione sui grafi di raggiungibilità dei modelli ottenuti

Dalle simulazioni condotte, è stato possibile osservare che, anche in questo caso, a mano che il modello migliorava, il grafo di raggiungibilità del modello integrato si è conformava al grafo di raggiungibilità del modello che simula il comportamento atteso dell’attuatore UDLA.

5.3 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – sensore di soft stop e sensore di end of stroke

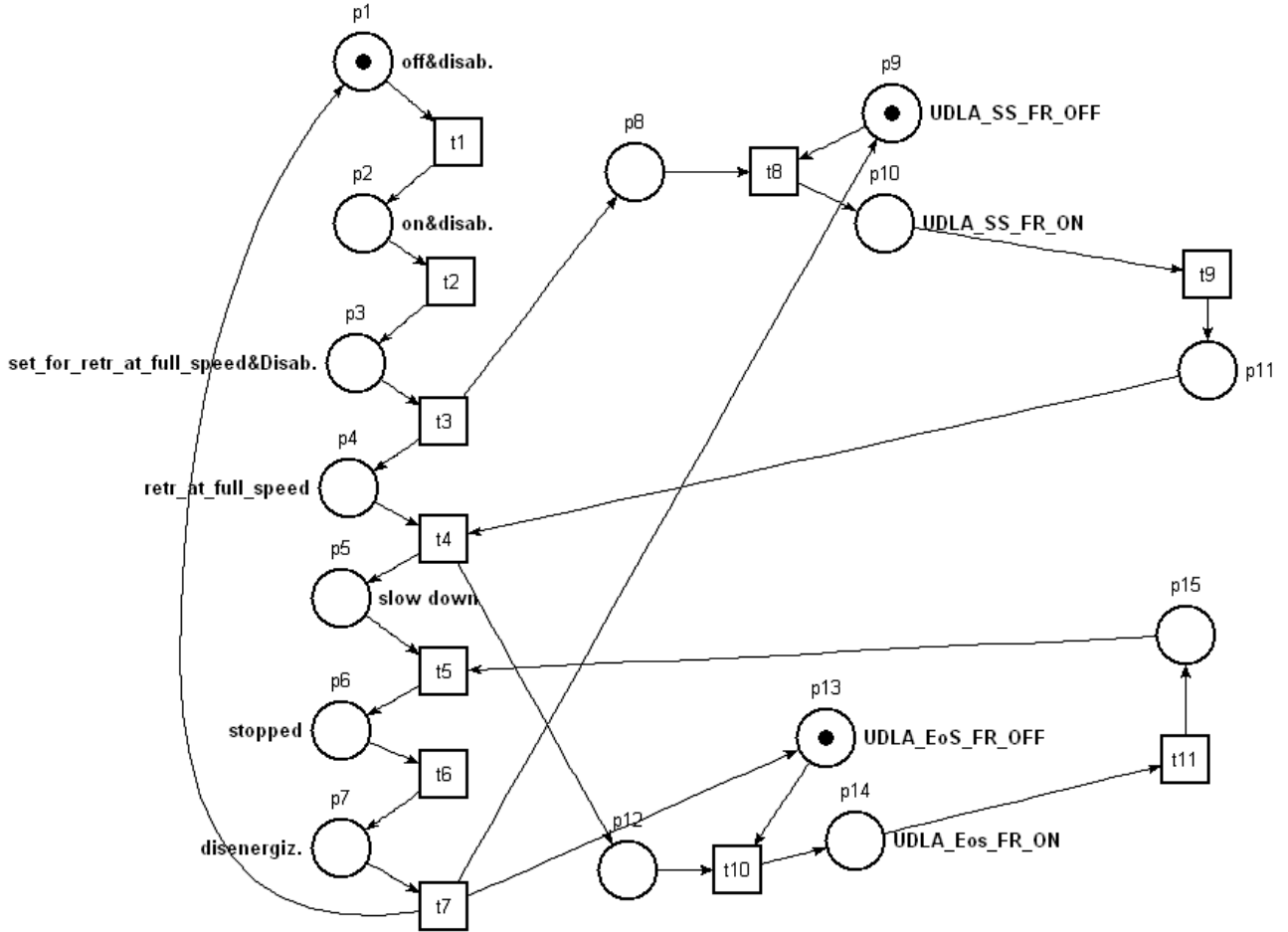


Figura 35: PN finale per la simulazione della integrazione fra UDLA , sensore di soft stop fully retracted e sensore di end of stroke fully retracted, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9 + p_{13}$ (1 token sul posto p_1 , uno sul posto p_9 ed uno sul posto p_{13}). Tale rete, progettata secondo i passi dell’algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione, intende modellare l’interazione fra il sensore di rallentamento , quello di arresto e l’attuatore UDLA. In particolare il comportamento dell’attuatore che viene prima rallentato, a seguito dell’attivazione del sensore di soft stop, poi arrestato a seguito della attivazione del sensore di end of stroke. La marcatura iniziale è riferita allo stato del sistema in cui l’attuatore è spento e disabilitato ed i due sensori entrambi ad off.

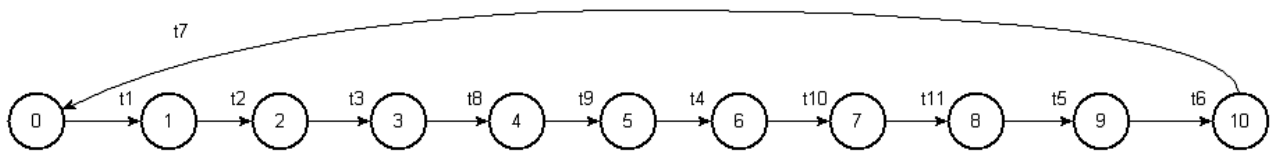


Figura 36: Grafo di raggiungibilità della rete marcata in cui si evidenzia assenza di evoluzioni dinamiche indesiderate. Il grafo evidenzia che la rete modella la sequenza di evoluzione desiderata.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$	$+ p_{13}$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$	$+ p_{13}$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$	$+ p_{13}$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_8 + p_9$	$+ p_{13}$
$M_4^T =$	p_4	$+ p_{10}$	$+ p_{13}$
$M_5^T =$	p_3	$+ p_{11}$	$+ p_{13}$
$M_6^T =$	p_5	$+ p_{12} + p_{13}$	
$M_7^T =$	p_5		$+ p_{14}$
$M_8^T =$	p_5		$+ p_{15}$
$M_9^T =$	p_6		
$M_{10}^T =$	p_7		

Figura 37: Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere la distribuzione dei tokens sui posti a seconda delle marcature raggiungibili a partire dalla marcatura iniziale.

Considerazione sul modello ottenuto

Il modello che simula l'integrazione dell'UDLA con i due sensori rappresenta un livello di integrazione ulteriore.

Ancora una volta è possibile osservare la struttura del grafo di raggiungibilità simile a quella del grafo di raggiungibilità dell'UDLA isolato.

5.4 Modello grafico per la simulazione della integrazione UDLA – interruttore di Uplock (Downlock)

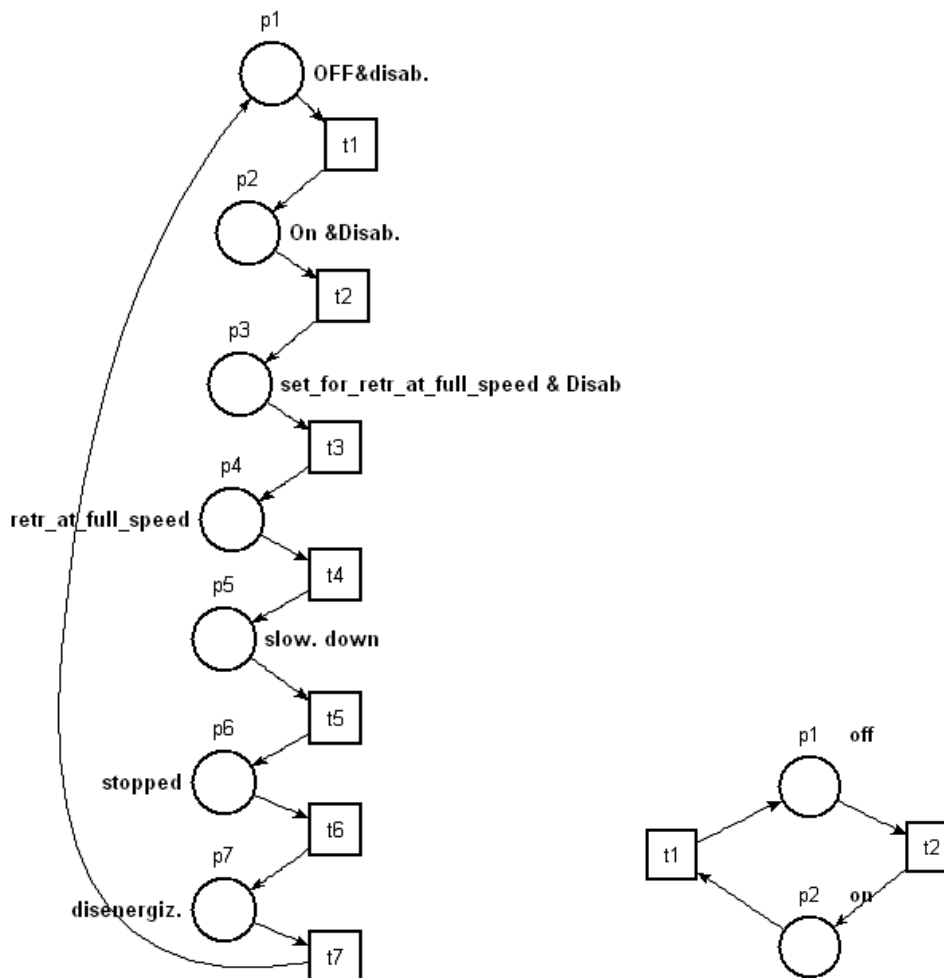


Figura 38: PN dell'attuatore UDLA isolato e PN di interruttore a due stati isolato progettate secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati. Rappresentano le reti di base da cui si è partiti per realizzare una PN iniziale che intende simulare il processo di integrazione fra attuatore UDLA e interruttore di UpLock. Con questa terminologia ci si è riferiti all'interruttore che fornisce l'informazione relativa a carrello bloccato in posizione up.

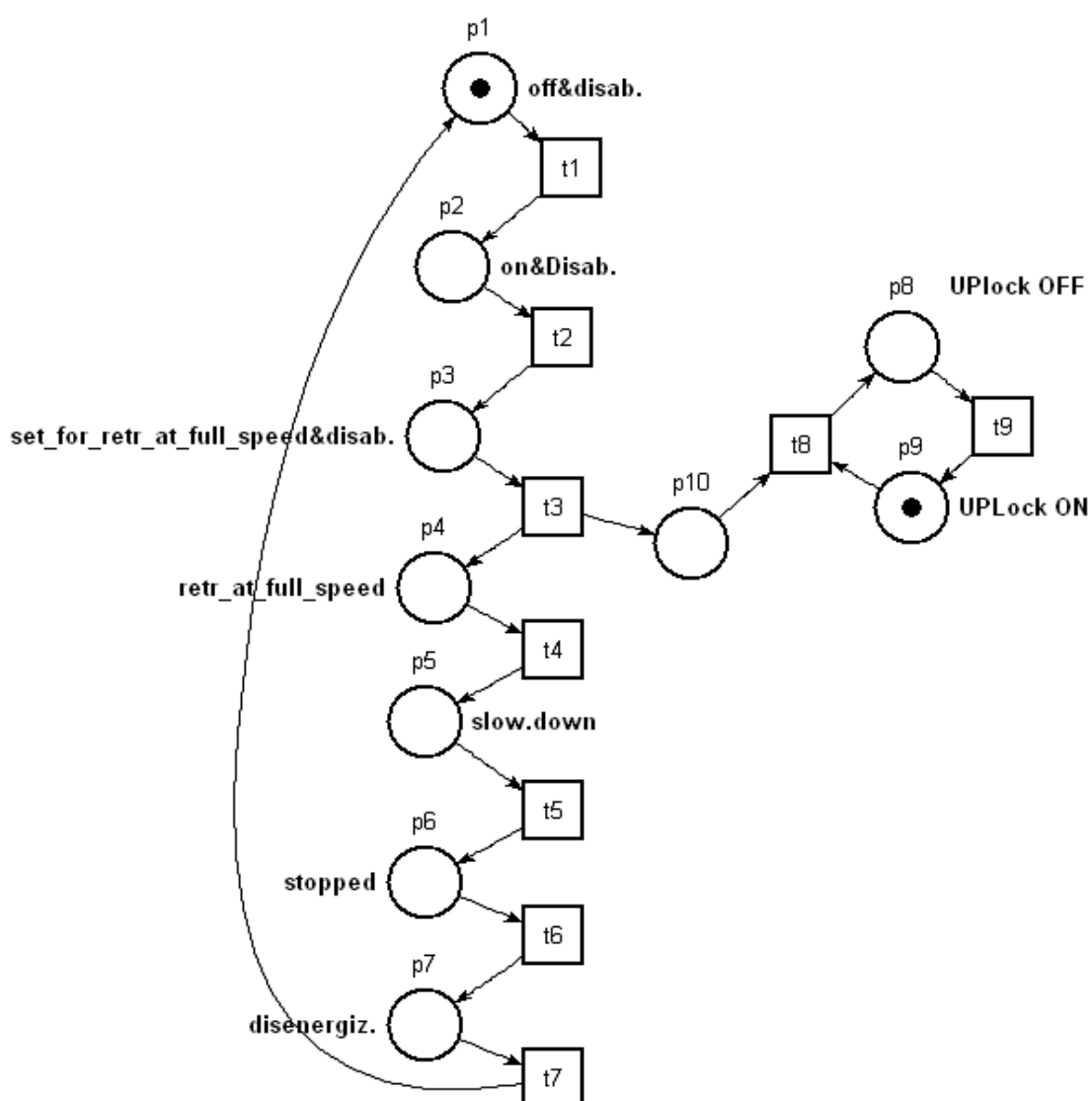


Figura 39: PN iniziale per il modello di integrazione UDLA-interruttore di upLock, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_9) progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione . La marcatura iniziale rappresenta lo stato del sistema in cui l'attuatore è spento e disabilitato e l'interruttore è on.

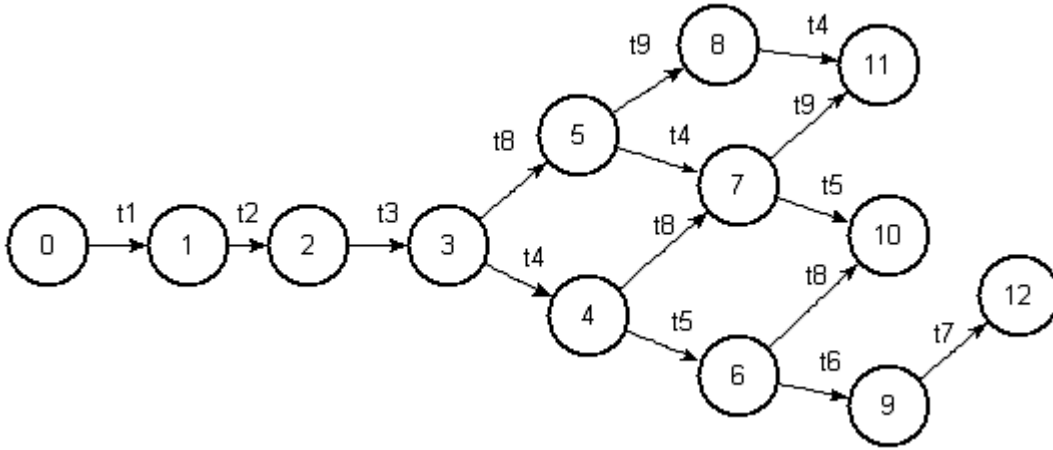


Figura 40: Grafo di raggiungibilità della rete marcata iniziale evidenziante una evoluzione indesiderata a partire dalla marcatura M_3 . In particolare, la traiettoria generata dallo sparo di t_4 evidenzia il comportamento del sistema che vede l'attuatore proseguire la sua attività senza il condizionamento dell'informazione dell'interruttore. Ciò è l'effetto dell'errore presente nella rete iniziale. Tale errore conduce alla generazione degli stati M_{10}, M_{11}, M_{12} che non sono deadlocks bensì il frutto dell'errore iniziale di modellazione.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_9 + p_{10}$
$M_4^T =$	p_5	$+ p_9 + p_{10}$
$M_5^T =$	p_4	$+ p_8$
$M_6^T =$	p_6	$+ p_9 + p_{10}$
$M_7^T =$	p_5	$+ p_8$
$M_8^T =$	p_4	$+ p_9$
$M_9^T =$	p_7	$+ p_9 + p_{10}$
$M_{10}^T =$	p_6	$+ p_8$
$M_{11}^T =$	p_5	$+ p_9$
$M_{12}^T =$	p_1	$+ p_9 + p_{10}$

Figura 41: Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere la distribuzione dei tokens sui posti a seconda delle marcature raggiungibili da quella iniziale.

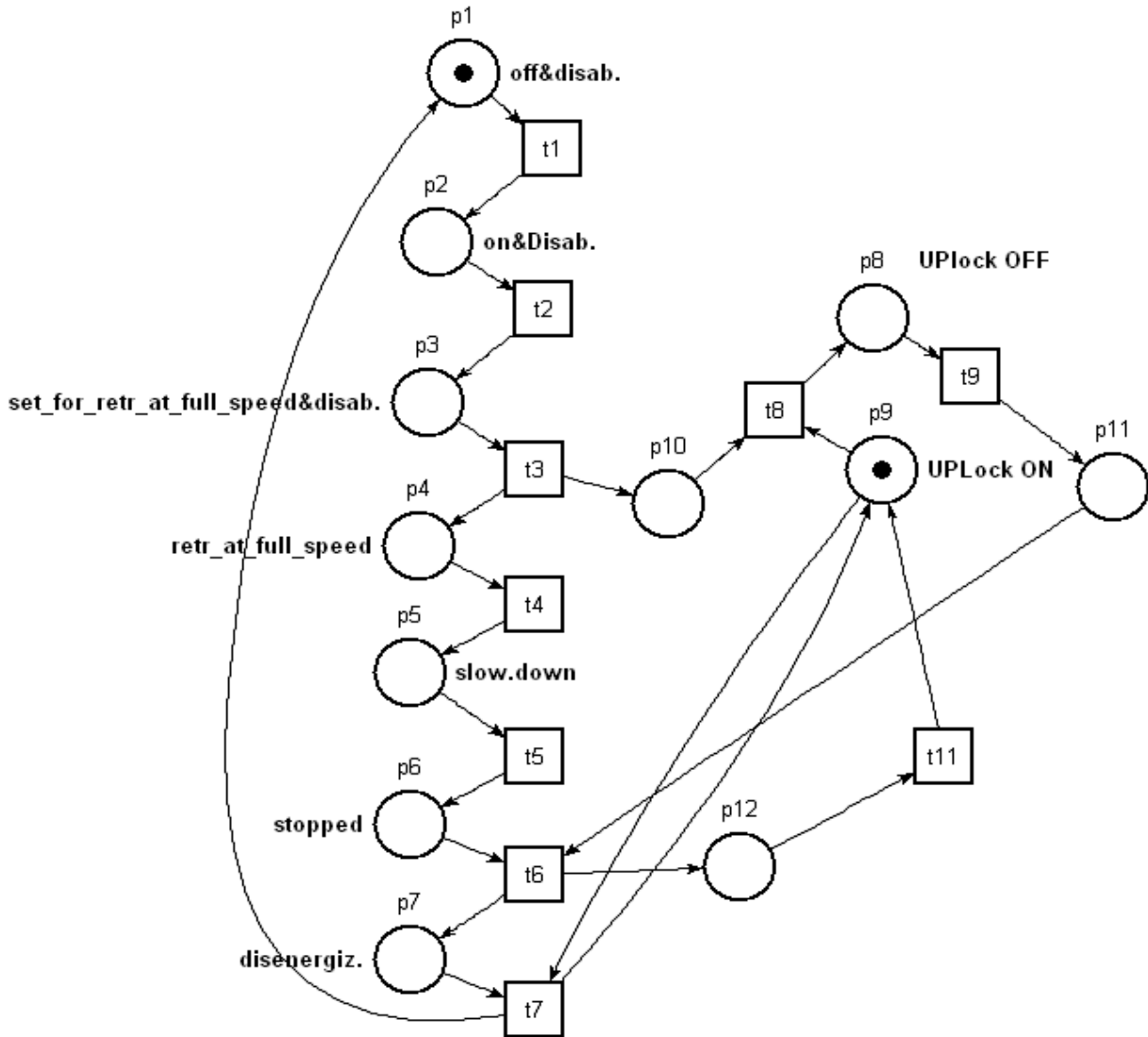


Figura 42 : PN finale per la simulazione della integrazione fra UDLA ed interruttore di Uplock nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_9$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_9), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato e l'interruttore è nello stato on.

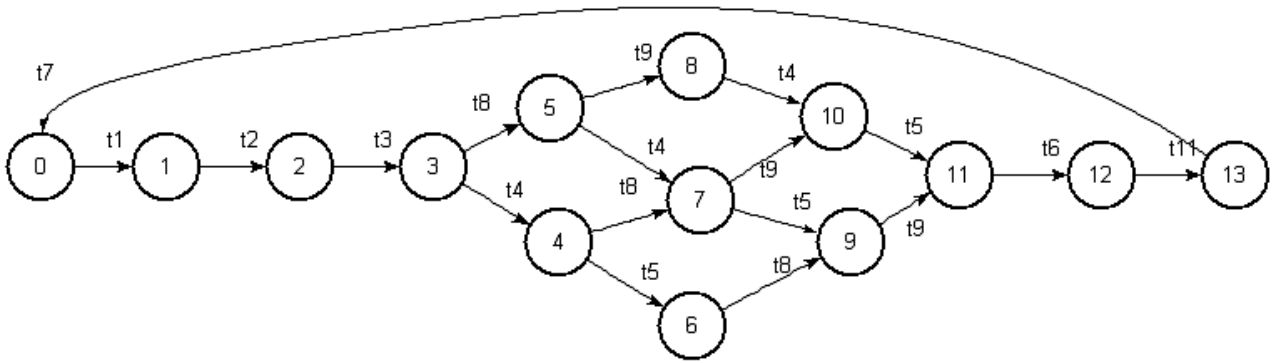


Figura 43: Grafo di raggiungibilità della rete marcata

Considerazioni emerse dall'osservazione del grafo di raggiungibilità

Dall'osservazione del grafo di raggiungibilità ottenuto dalla simulazione della rete marcata, si evince che la biforcazione a partire dalla marcatura M_3 indica la possibilità che il sistema possa andare in uno stato (corrispondente alla marcatura M_6) in cui l'attuatore è armato e l'interruttore non è scattato in stato off.

Questo stato, sebbene non sia un deadlock, fa rilevare che, senza ulteriori interventi, se l'interruttore non cambia stato, l'attuatore resterà fermo. Ciò indica che un eventuale blocco dell'interruttore può indurre un malfunzionamento del sistema.

Lo stato rappresentato dalla marcatura M_4 può indicare dunque un ritardo nello scatto dell'interruttore oppure un suo effettivo non scatto allo stato off.

Tale ritardo può essere recuperato, come si evidenzia nella evoluzione del comportamento che vede il sistema passare dalla marcatura M_4 alla marcatura M_7 e confluire poi nello stato M_{11} in cui l'interruttore è passato ad off.

Ad esempio, la traiettoria $M_4[t_8 > M_7[t_5 > M_9[t_9 > M_{11}$ rappresenta una evoluzione del sistema che vede il comportamento procedere correttamente malgrado il ritardo nella commutazione dell'interruttore.

Viceversa, la traiettoria $M_4[t_5 > M_6$ indica che l'attuatore è fermo in attesa ma l'interruttore non è scattato.

E' possibile inoltre notare che, in questo caso, il grafo di raggiungibilità non ha seguito la struttura di quello dello UDLA isolato. Ciò è presumibilmente dovuto al fatto che, mentre i sensori di soft stop e di end of stroke, sono collegati al funzionamento dell'attuatore e quindi in un modello che

vuol simulare il comportamento integrato desiderato, vengono in qualche modo “assorbiti”, l’interruttore di uplock (o di downlock) è considerato un ente “esterno” al funzionamento dell’attuatore. Di conseguenza, la sua integrazione col funzionamento dell’attuatore può indurre comportamenti del sistema diversi da quelli che ci si attendeva, come mostrano i percorsi alternativi presenti nel grafo di raggiungibilità.

$M_0^T =$	p_1	$+ p_9$
$M_1^T =$	p_2	$+ p_9$
$M_2^T =$	p_3	$+ p_9$
$M_3^T =$	p_4	$+ p_9 + p_{10}$
$M_4^T =$	p_5	$+ p_9 + p_{10}$
$M_5^T =$	p_4	$+ p_{10}$
$M_6^T =$	p_6	$+ p_9 + p_{10}$
$M_7^T =$	p_5	$+ p_8$
$M_8^T =$	p_4	$+ p_{11}$
$M_9^T =$	p_6	$+ p_8$
$M_{10}^T =$	p_5	$+ p_{11}$
$M_{11}^T =$	p_6	$+ p_{11}$
$M_{12}^T =$	p_7	$+ p_{12}$
$M_{13}^T =$	p_7	$+ p_9$

Figura 44: Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui si evincono le distribuzioni dei tokens sui vari posti della rete, a partire dalla marcatura iniziale, a seconda dello stato in cui si trova la rete che simula l’integrazione fra i due componenti.

Considerazioni sul modello di simulazione della integrazione UDLA – interruttore di UpLock

Il modello realizzato risulta concettualmente applicabile anche alla modellazione della integrazione fra UDLA ed interruttore di Downlock.

Di conseguenza, esso rappresenta una base da cui partire per aumentare il livello di integrazione.

Ovvero, allorquando si vuol rappresentare l'evoluzione dell'attuatore denominato UDLA, condizionata dalla presenza dell'interruttore di Uplock e dell' interruttore di Downlock.

5.5 Modello grafico per la simulazione dell' integrazione ERA – sensore soft stop

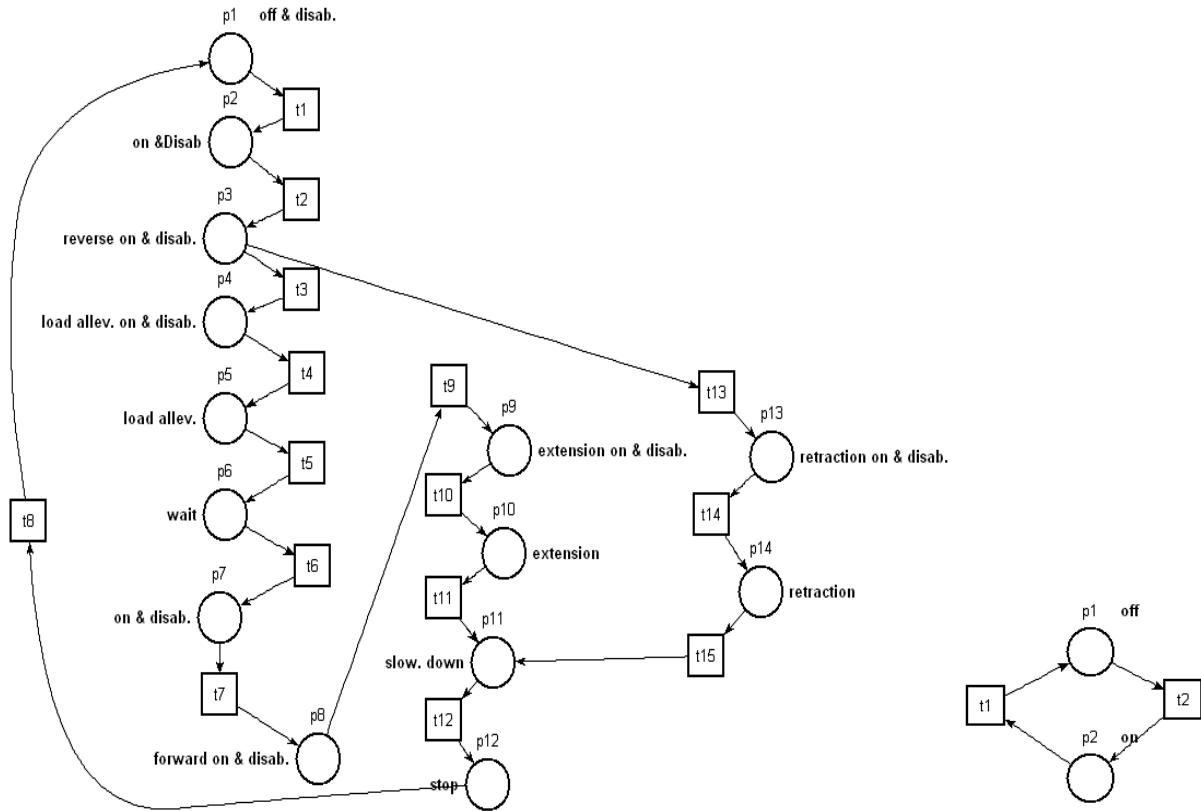


Figura 45: PN dell'attuatore ERA isolato e PN di sensore isolato progettate secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati. Rappresentano le reti di base da cui si è partiti per ricavare il modello di simulazione della integrazione fra i due componenti. Il sensore di soft stop cui ci si riferisce in questo caso è il sensore utilizzato per rallentare l'attuatore quando esso svolge la sua attività durante l'estensione del carrello.

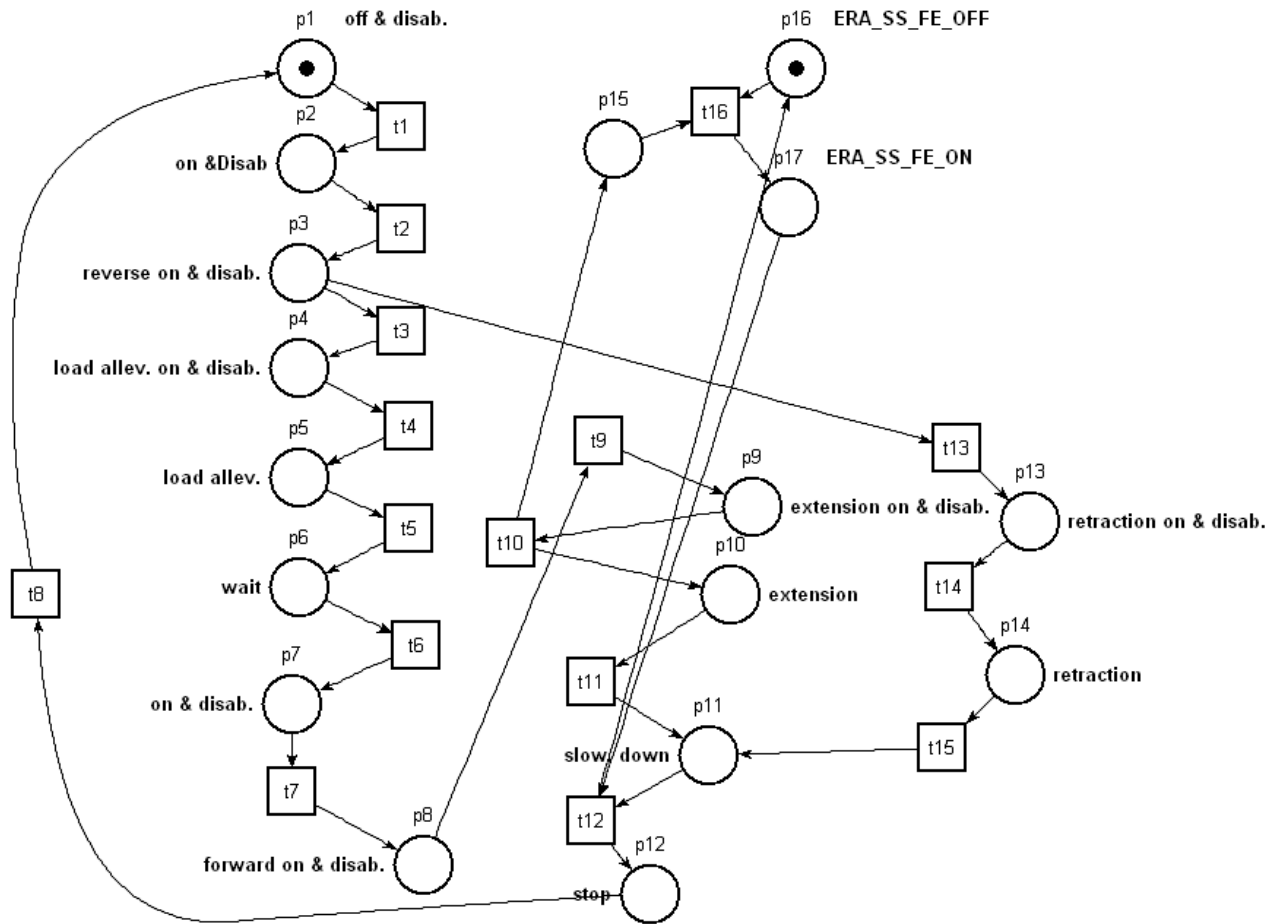


Figura 46: PN iniziale per la simulazione della integrazione fra ERA e sensore di soft stop fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{16}$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_{16}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione.

La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed il sensore ad off.

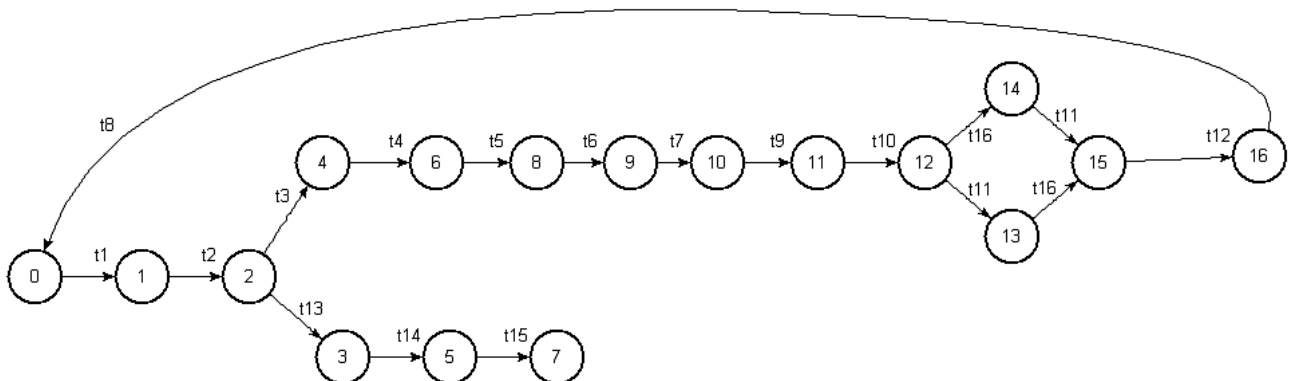


Figura 47: grafo di raggiungibilità della rete marcata. La biforcazione a partire dalla marcatura M_2 mostra una evoluzione dinamica a partire dallo sparo della transizione t_{15} che conduce ad un deadlock. Tale evenienza evidenzia il blocco dell'attuatore nello stato di rallentamento a seguito della non corretta integrazione fra i due componenti.

$M_0^T = p_1$		$+p_{16}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{16}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{16}$
$M_3^T =$	$+p_{13}$	$+ p_{16}$
$M_4^T = p_4$		$+ p_{16}$
$M_5^T =$	$+p_{14}$	$+ p_{16}$
$M_6^T = p_5$		$+ p_{16}$
$M_7^T =$	p_{11}	$+ p_{16}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{16}$
$M_9^T = p_7$		$+ p_{16}$
$M_{10}^T = p_8$		$+p_{16}$
$M_{11}^T = p_9$		$+p_{16}$
$M_{12}^T = p_{10}$		$+ p_{15} + p_{16}$
$M_{13}^T = p_{11}$		$+ p_{15} + p_{16}$
$M_{14}^T = p_{10}$		$+p_{17}$
$M_{15}^T = p_{11}$		$+p_{17}$
$M_{16}^T = p_{12}$		$+p_{16}$

Figura 48: insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere la distribuzione dei tokens sui vari posti a seconda delle marcature raggiungibili a partire da quella iniziale.

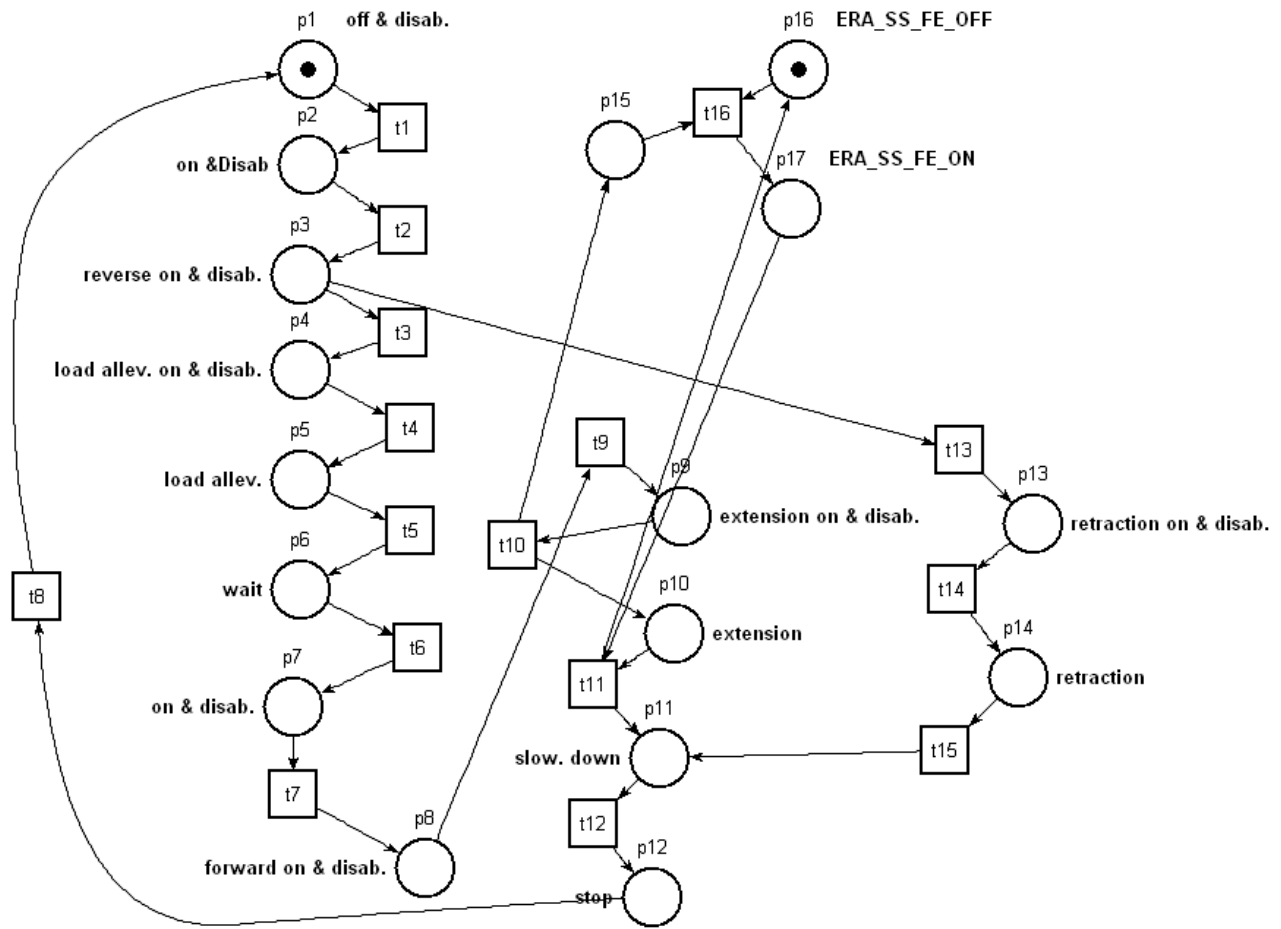


Figura 49: PN finale per la simulazione della integrazione fra ERA e sensore di soft stop fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{16}$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_{16}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed il sensore ad off.

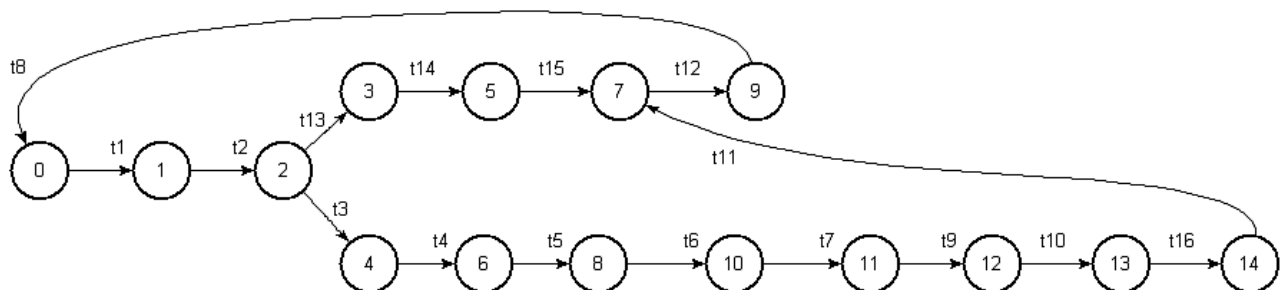


Figura 50: grafo di raggiungibilità della rete marcata in cui è possibile osservare la rimozione del percorso che conduceva allo stato di stallo. La rete finale progettata modella la corretta sequenza di integrazione fra i due componenti. L'attuatore, in estensione, viene rallentato solo dopo l'attivazione del relativo sensore.

$M_0^T = p_1$		$+p_{16}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{16}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{16}$
$M_3^T =$	$+p_{13}$	$+ p_{16}$
$M_4^T = p_4$		$+ p_{16}$
$M_5^T =$	$+p_{14}$	$+ p_{16}$
$M_6^T = p_5$		$+ p_{16}$
$M_7^T =$	p_{11}	$+ p_{16}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{16}$
$M_9^T =$	p_{12}	$+ p_{16}$
$M_{10}^T = p_7$		$+p_{16}$
$M_{11}^T = p_8$		$+p_{16}$
$M_{12}^T = p_9$		$+p_{16}$
$M_{13}^T = p_{10}$		$+ p_{15} + p_{16}$
$M_{14}^T = p_{10}$		$+p_{17}$

Figura 51: insieme di raggiungibilità della rete marcata finale. Da essa è possibile evincere la distribuzione dei tokens sui vari posti a seconda delle marcature raggiungibili a partire dalla marcatura iniziale.

Osservazione sui grafi di raggiungibilità dei modelli ottenuti

Ancora è possibile osservare che a mano che il modello si è affinato, il grafo di raggiungibilità del modello integrato si è conformato al grafo di raggiungibilità del modello che simula il comportamento atteso dell'attuatore ERA.

5.6 Modello grafico per la simulazione dell'integrazione ERA – sensore end of stroke

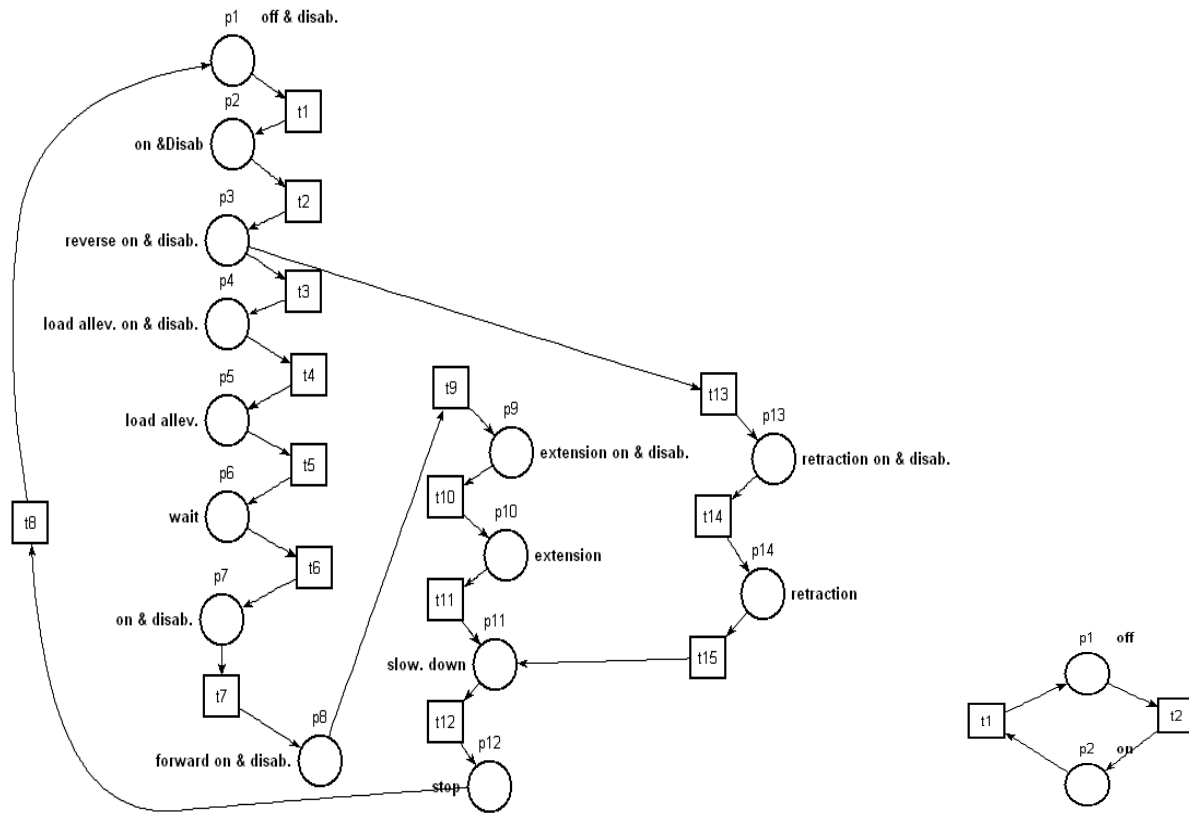


Figura 52: PN dell'attuatore ERA isolato e PN di sensore isolato progettate secondo i passi dell'algoritmo per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti isolati.

Rappresentano le reti di base da cui si è partiti per la realizzazione del modello di integrazione fra i due componenti. Il sensore cui si fa riferimento è utilizzato per arrestare l'attuatore durante la sua attività in estensione.

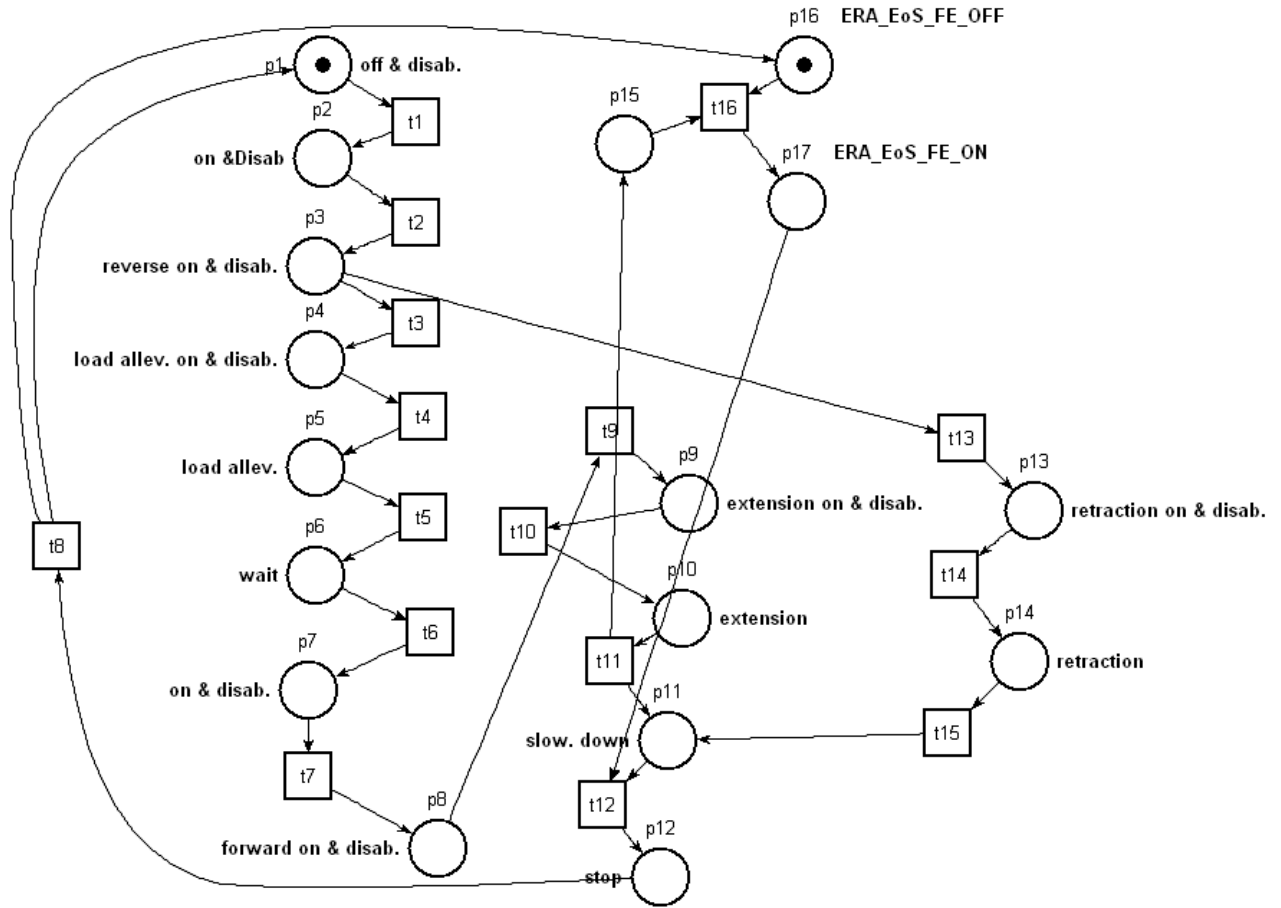


Figura 53: PN iniziale per la simulazione della integrazione fra ERA e sensore di end of stroke fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{16}$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_{16}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed il sensore ad off.

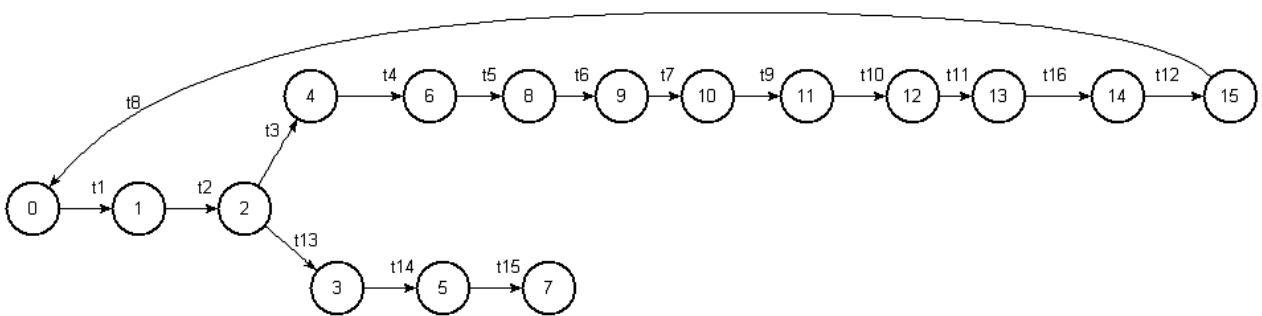


Figura 54: Grafo di raggiungibilità della rete marcata iniziale in cui si evidenzia una biforcazione che conduce ad uno stato di deadlock. Lo stato corrispondente alla marcatura M_7 evidenzia che l'attuatore, in rallentamento, non viene arrestato poiché il sensore non si attiva.

$M_0^T = p_1$		$+p_{16}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{16}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{16}$
$M_3^T =$	$+p_{13}$	$+ p_{16}$
$M_4^T = p_4$		$+ p_{16}$
$M_5^T =$	$+p_{14}$	$+ p_{16}$
$M_6^T = p_5$		$+ p_{16}$
$M_7^T =$	p_{11}	$+ p_{16}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{16}$
$M_9^T = p_7$		$+ p_{16}$
$M_{10}^T = p_8$		$+p_{16}$
$M_{11}^T = p_9$		$+p_{16}$
$M_{12}^T = p_{10}$		$+p_{16}$
$M_{13}^T = p_{11}$		$+ p_{15} + p_{16}$
$M_{14}^T = p_{11}$		$+p_{17}$
$M_{15}^T = p_{12}$		

Figura 55 : Insieme di raggiungibilità della rete marcata iniziale da cui è possibile evincere la distribuzione dei tokens sui posti della rete al variare delle marcature raggiungibili dalla marcatura M_0 .

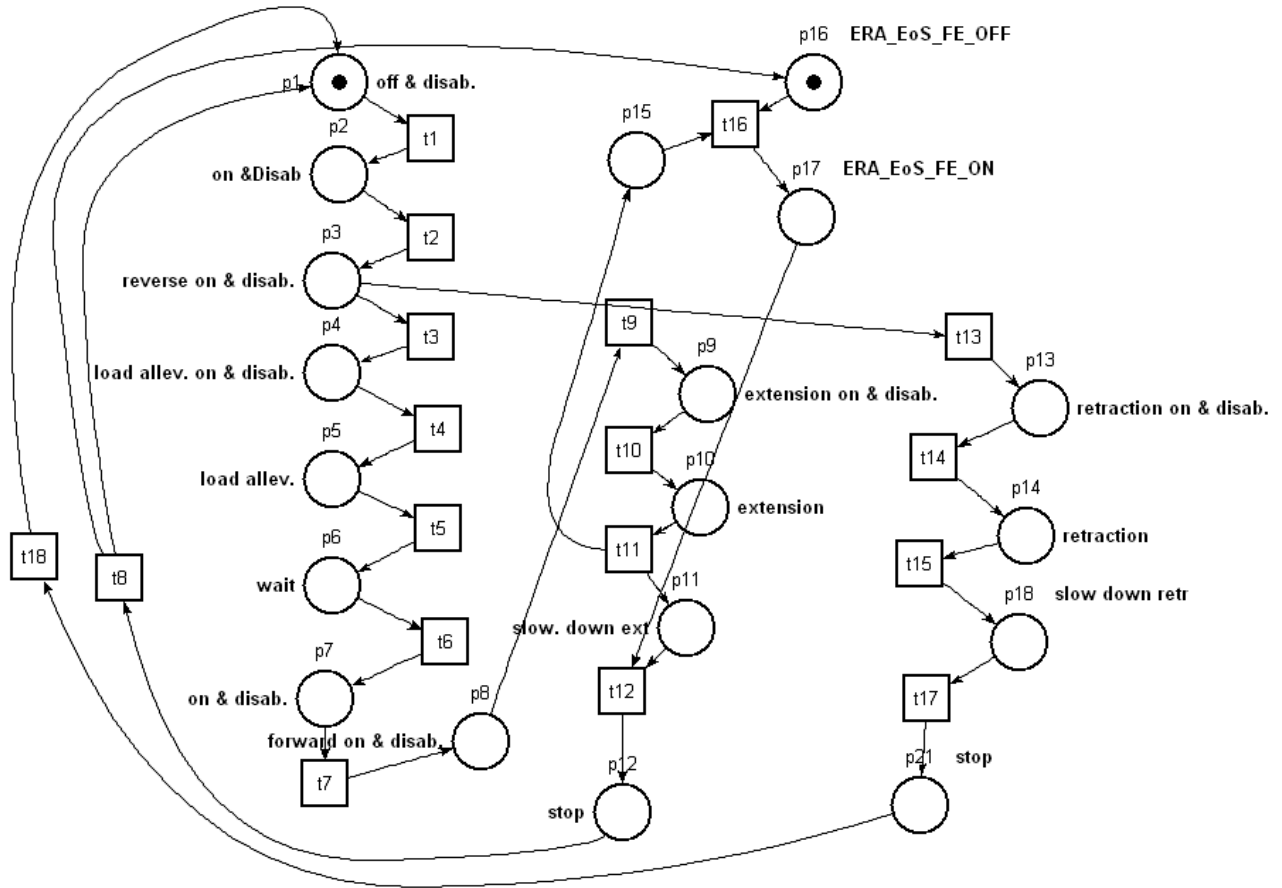


Figura 56: PN finale per la simulazione della integrazione fra ERA e sensore di end of stroke fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{16}$ (1 token sul posto p_1 ed uno sul posto p_{16}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed il sensore ad off.

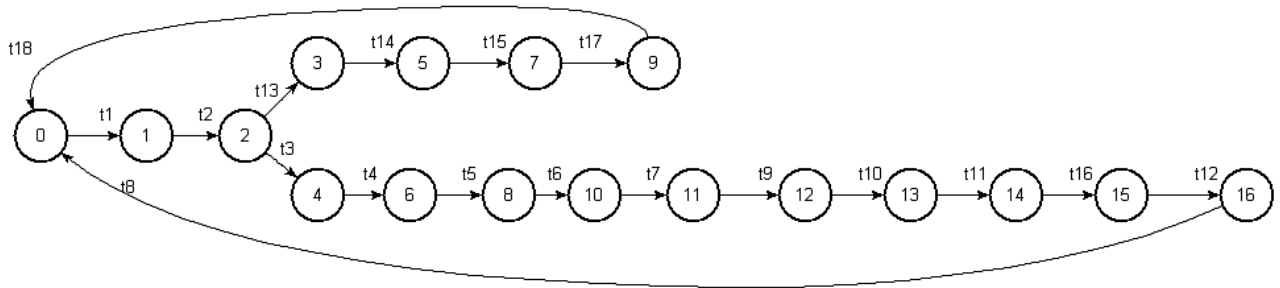


Figura 57: Grafo di raggiungibilità della rete marcata evidenziante la rimozione del deadlock. La rimozione del blocco indica che la rete progettata simula la corretta sequenza di integrazione fra i due componenti. L'attuatore, in rallentamento, viene arrestato all'attivazione del relativo sensore di stop.

$M_0^T = p_1$		$+p_{16}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{16}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{16}$
$M_3^T =$	p_{13}	$+ p_{16}$
$M_4^T =$	p_4	$+ p_{16}$
$M_5^T =$	$+p_{14}$	$+ p_{16}$
$M_6^T =$	p_5	$+ p_{16}$
$M_7^T =$		$p_{16} \quad + p_{18}$
$M_8^T =$	p_6	$+p_{16}$
$M_9^T =$		$p_{16} \quad + p_{21}$
$M_{10}^T =$	p_7	$+p_{16}$
$M_{11}^T =$	p_8	$+p_{16}$
$M_{12}^T =$	p_9	$+p_{16}$
$M_{13}^T =$	p_{10}	$+p_{16}$
$M_{14}^T =$	p_{11}	$p_{15} \quad +p_{16}$
$M_{15}^T =$	p_{11}	$+p_{17}$
$M_{16}^T =$	p_{12}	

Figura 58 : Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere le distribuzioni dei tokens sui posti della rete finale in base alle marcature raggiungibili da quella iniziale.

Osservazione sui grafi di raggiungibilità dei modelli ottenuti

Ancora è possibile osservare che a mano che il modello si è affinato, il grafo di raggiungibilità del modello integrato si è conformato al grafo di raggiungibilità del modello che simula il comportamento atteso dell'attuatore ERA isolato.

5.7 Modello grafico per la simulazione dell'integrazione ERA – sensore soft stop e sensore end of stroke

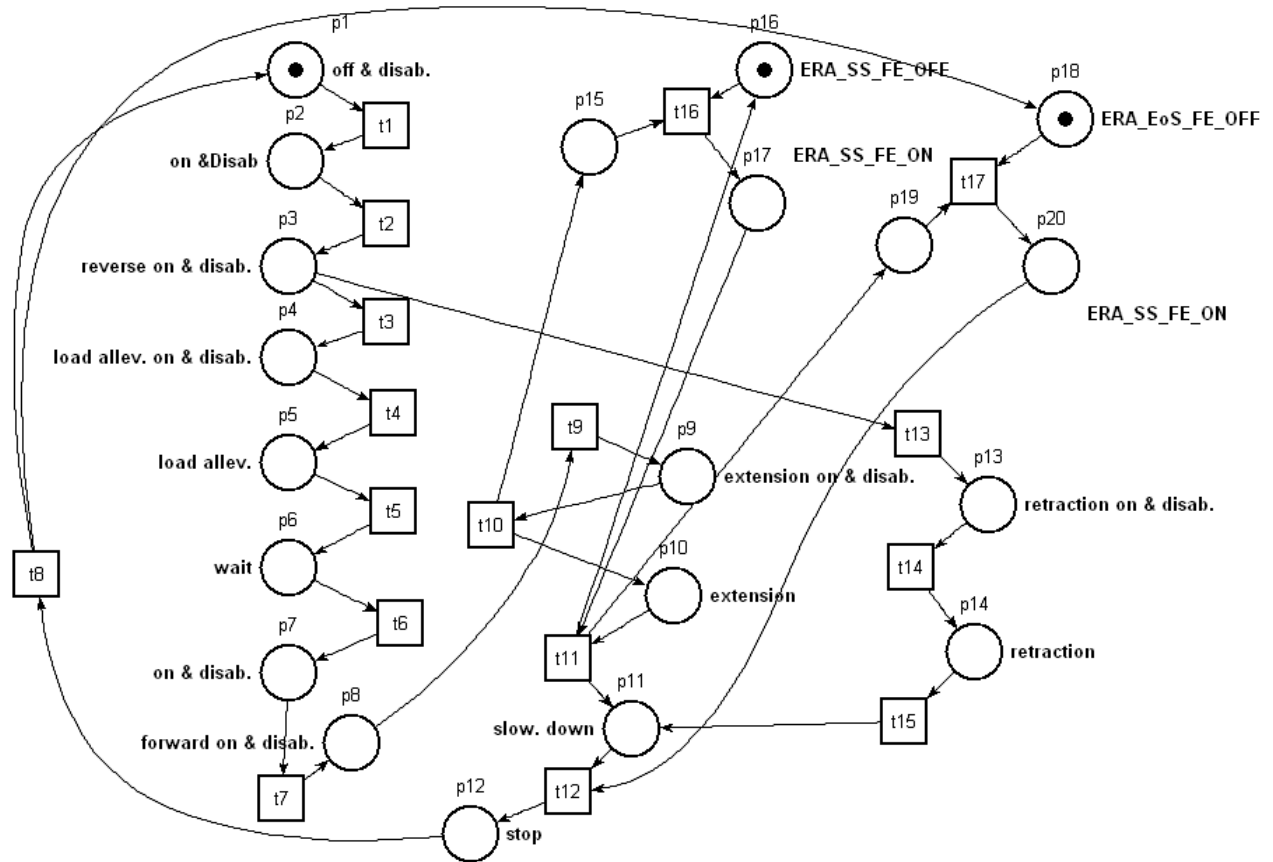


Figura 59 : PN iniziale per la simulazione della integrazione fra ERA - sensore di soft stop fully extended e sensore di end of stroke fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{16} + p_{18}$ (1 token sul posto p_1 , uno sul posto p_{16} ed uno sul posto p_{18}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed i due sensori sono ad off.

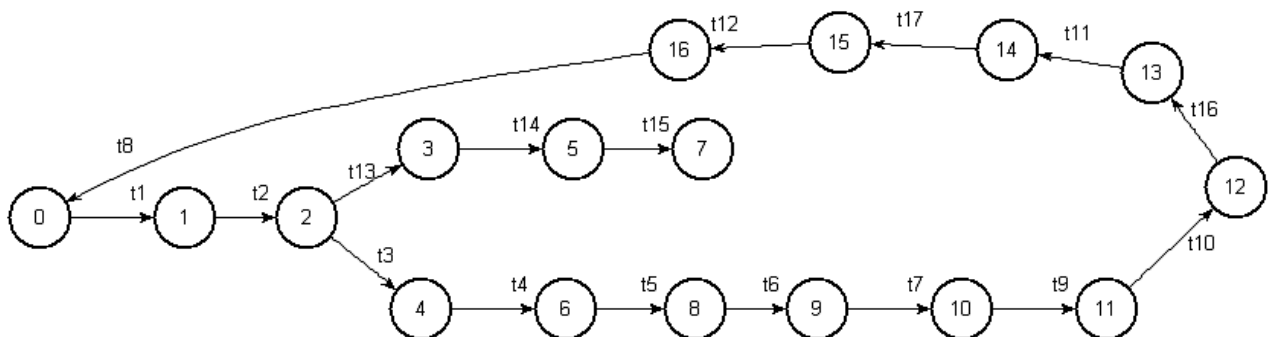


Figura 60: Grafo di raggiungibilità della rete iniziale da cui si rileva uno stato morto. Esso rappresenta il frutto dell'errore presente nella rete iniziale.

$M_0^T = p_1$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_3^T =$	$+p_{13}$	$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_4^T = p_4$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_5^T =$	p_{14}	$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_6^T = p_5$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_7^T =$	p_{11}	$+ p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_9^T = p_7$		$+ p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_{10}^T = p_8$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_{11}^T = p_9$		$+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_{12}^T = p_{10}$		$+p_{15}+p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_{13}^T = p_{10}$			$+p_{17} + p_{18}$
$M_{14}^T = p_{11}$		$+p_{16}$	$+ p_{18} + p_{19}$
$M_{15}^T = p_{11}$		$+p_{16}$	$+ p_{20}$
$M_{16}^T = p_{12}$		$+p_{16}$	

Figura 61: Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere le distribuzioni dei tokens sui posti della rete marcata nella varie marcature raggiungibili a partire da quella iniziale.

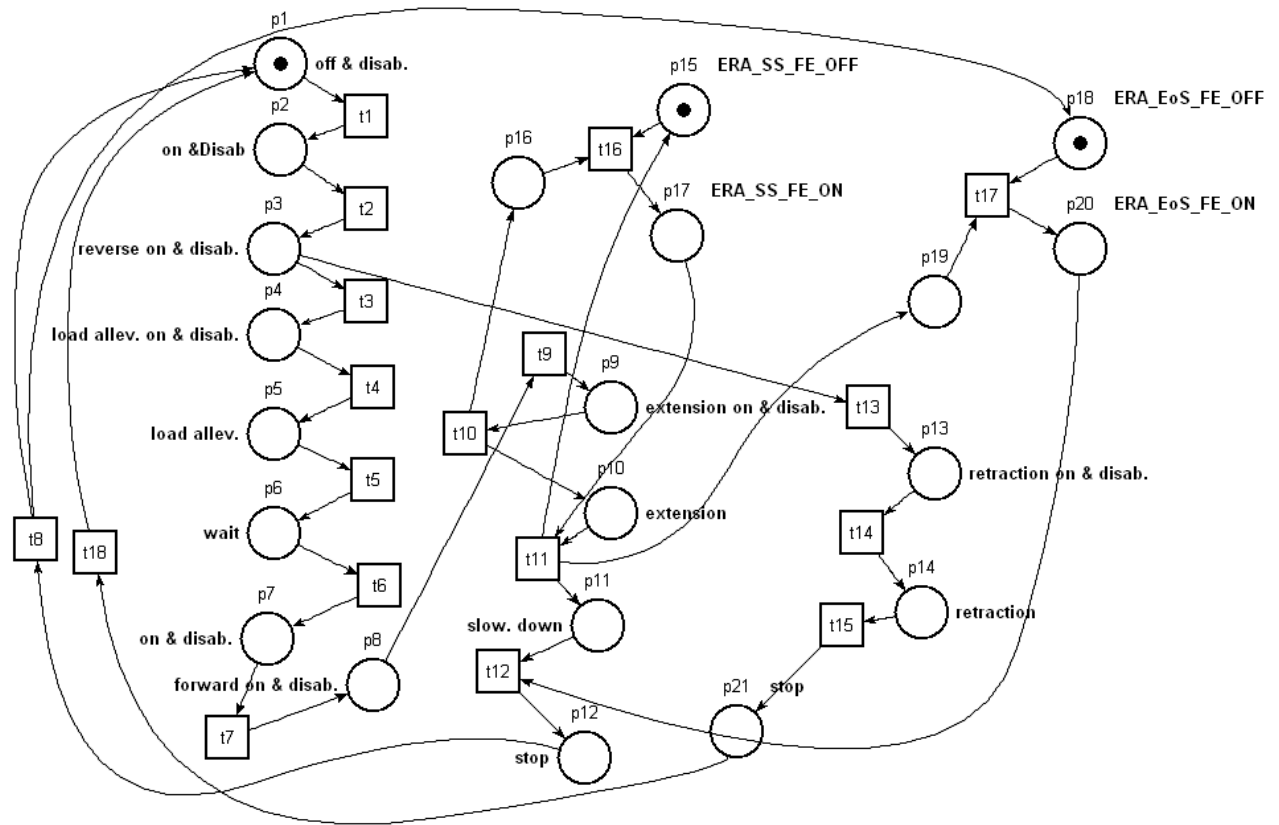


Figura 62: PN intermedia per la simulazione della integrazione fra ERA - sensore di soft stop fully extended e sensore di end of stroke fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{15} + p_{18}$ (1 token sul posto p_1 , uno sul posto p_{15} ed uno sul posto p_{18}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione.

La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed i due sensori sono ad off.

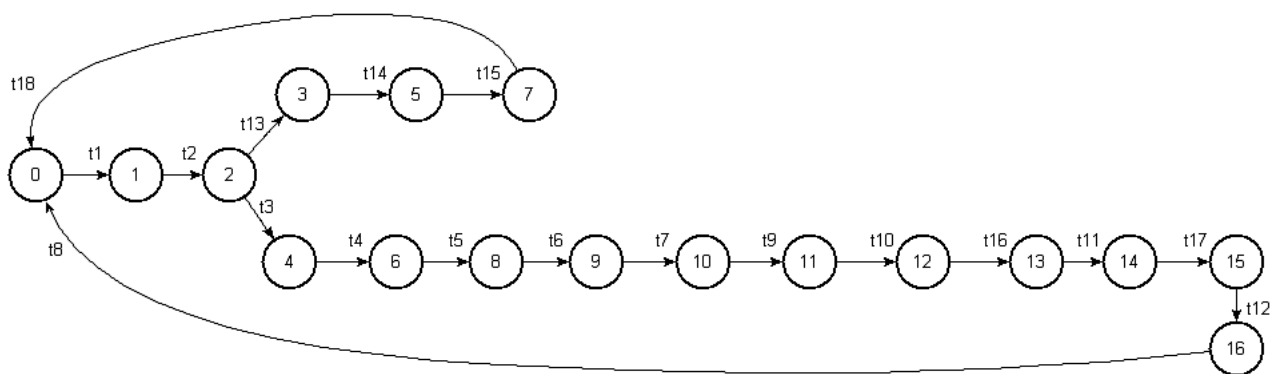


Figura 63: : Grafo di raggiungibilità della rete intermedia marcata in cui si evidenzia un miglioramento nella rappresentazione della evoluzione del comportamento.

$M_0^T = p_1$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_3^T =$	p_{13}	$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_4^T = p_4$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_5^T =$		$p_{14} + p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_6^T = p_5$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_7^T =$		p_{15}	$+ p_{18} + p_{21}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_9^T = p_7$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_{10}^T = p_8$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_{11}^T = p_9$		$+p_{15}$	$+ p_{18}$
$M_{12}^T = p_{10}$		$+p_{15} + p_{16}$	$+ p_{18}$
$M_{13}^T = p_{10}$			$+p_{17} + p_{18}$
$M_{14}^T = p_{11}$		$+p_{15}$	$+p_{18} + p_{19}$
$M_{15}^T = p_{11}$		$+p_{15}$	$+p_{20}$
$M_{16}^T = p_{12}$		$+p_{15}$	

Figura 64 : Insieme di raggiungibilità della rete marcata intermedia da cui è possibile evincere le distribuzioni dei tokens sui posti della rete nelle varie marcature raggiungibili dalla marcatura iniziale.

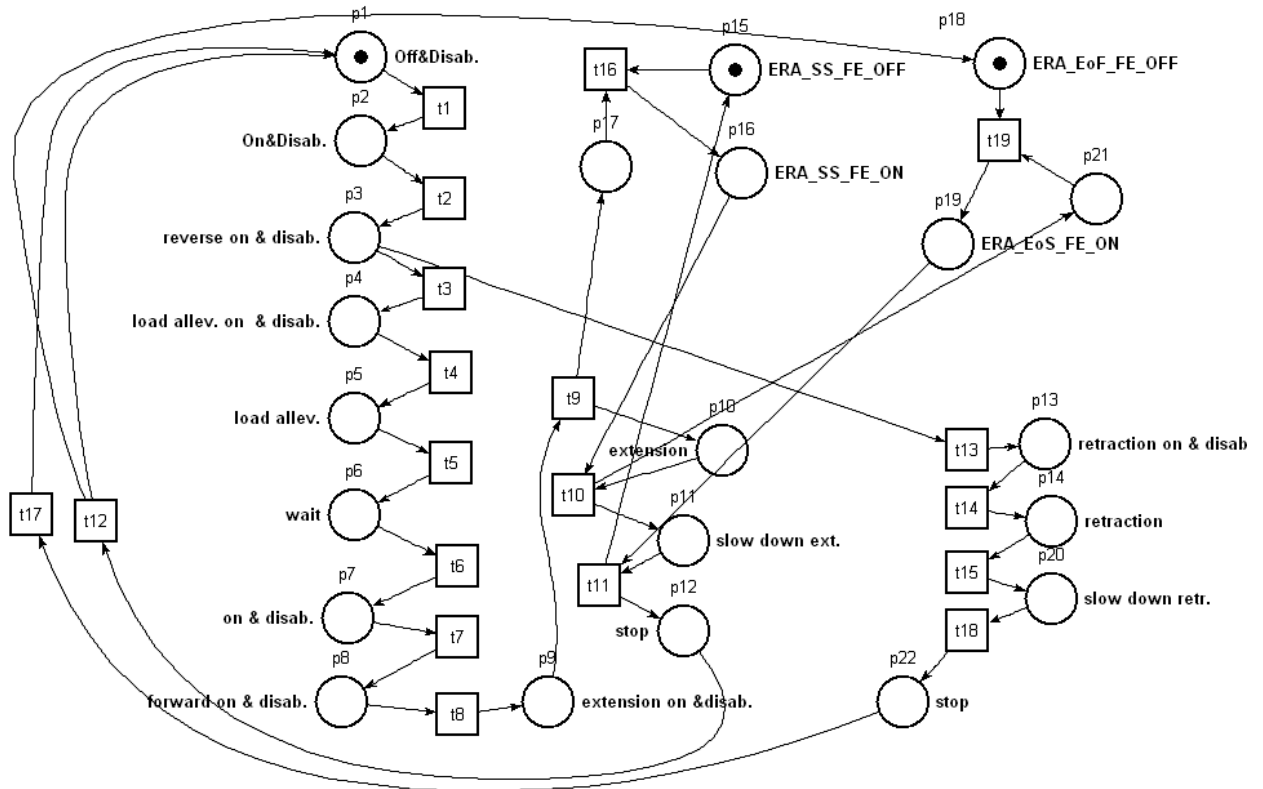


Figura 65: PN finale per la simulazione della integrazione fra ERA - sensore di soft stop fully extended e sensore di end of stroke fully extended, nella marcatura $M_0^T = p_1 + p_{15} + p_{18}$ (1 token sul posto p_1 , uno sul posto p_{15} ed uno sul posto p_{18}), progettata secondo i passi dell'algoritmo modificato per la realizzazione di modelli di simulazione a rete di Petri p/t del comportamento di componenti a seguito di integrazione. La marcatura iniziale rappresenta lo stato iniziale del sistema in cui l'attuatore è assunto spento e disabilitato ed i due sensori sono ad off.

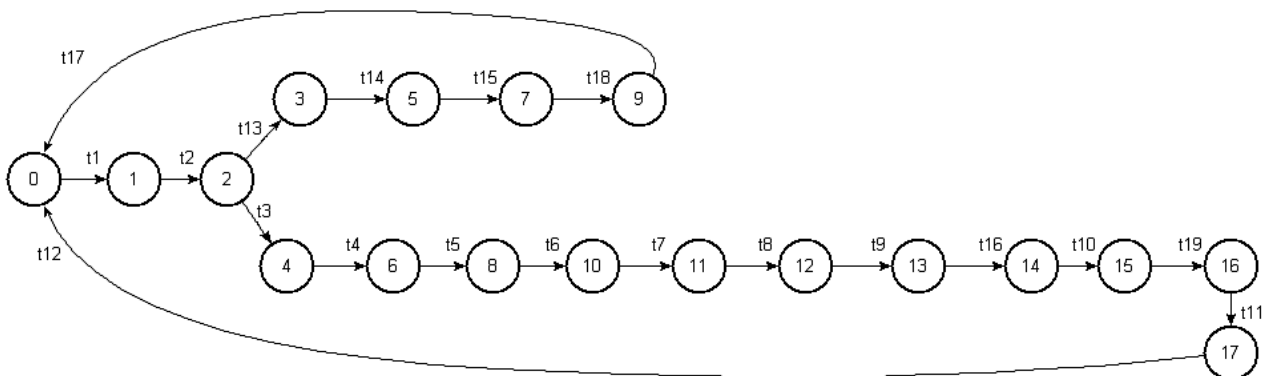


Figura 66 : Grafo di raggiungibilità della rete finale da cui non si evincono traiettorie dinamiche indesiderate. La rete progettata modella l'integrazione fra i tre componenti in modo che l'attuatore, durante la sua attività in estensione, viene prima rallentato a seguito dell'attivazione del sensore di soft stop e poi, all'attivazione del sensore di end of stroke, viene arrestato.

$M_0^T = p_1$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_1^T = p_2$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_2^T = p_3$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_3^T =$	$+p_{13}$	$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_4^T = p_4$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_5^T =$	p_{14}	$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_6^T = p_5$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_7^T =$		p_{15}	$+p_{18} + p_{20}$
$M_8^T = p_6$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_9^T =$		p_{15}	$+p_{18} + p_{22}$
$M_{10}^T = p_7$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_{11}^T = p_8$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_{12}^T = p_9$		$+p_{15}$	$+p_{18}$
$M_{13}^T = p_{10}$		$+p_{15}$	$+p_{17} + p_{18}$
$M_{14}^T = p_{10}$		$+p_{16}$	$+p_{18}$
$M_{15}^T = p_{11}$			$+p_{18} + p_{21}$
$M_{16}^T = p_{11}$			$+p_{19}$
$M_{17}^T = p_{12}$		$+p_{15}$	

Figura 67 : Insieme di raggiungibilità della rete marcata da cui è possibile evincere le distribuzioni dei tokens sui posti della rete marcata nella varie marcature raggiungibili a partire da quella iniziale.

Osservazione sui grafi di raggiungibilità dei modelli ottenuti

Ancora è possibile osservare che a mano che il modello si è affinato, il grafo di raggiungibilità del modello integrato si è conformato al grafo di raggiungibilità del modello che simula il comportamento atteso dell'attuatore ERA isolato.

Osservazione sul modello relativo alla rete intermedia

Tale rete è un modello relativamente corretto per rappresentare l'interazione in oggetto.

Essa infatti, modella correttamente il comportamento della integrazione dell'ERA con i due sensori considerati ma presenta un errore dovuto alla mancata modellazione della condizione di rallentamento dell'attuatore durante la ritrazione.

Errore di modellazione rimosso nel modello finale.

Considerazioni sul modello di simulazione della integrazione ERA – sensore di soft stop fully extended e sensore di end of stroke fully extended

Osservando il modello realizzato, si intuisce che risulta concettualmente applicabile anche alla modellazione della integrazione fra ERA ,sensore di soft stop fully retracted e sensore di end of stroke fully retracted. Dove, con tale etichetta ci si vuol riferire ai rispettivi sensori per il rallentamento e l'arresto dell'attuatore quando questi è utilizzato per attività di estensione.

Di conseguenza, esso rappresenta una base da cui partire per aumentare il livello di integrazione.

Ovvero, allorquando si vuol osservare cosa potrebbe accadere quando si considera l'integrazione fra l'attuatore denominato ERA, i due sensori (SS ed EoS) usati per rallentamento e arresto durante l'estensione ed altri due sensori (SS ed Eos) usati per compiere le stesse attività durante l'attività di ritrazione del carrello.

Conclusioni

Le reti progettate hanno evidenziato la possibilità di rilevare possibili malfunzionamenti che possono insorgere nella fase di integrazione dei componenti del sistema.

Modellando opportunamente le evoluzioni dinamiche attese dai singoli componenti si può simulare la situazione di un componente isolato in grado di soddisfare le specifiche attese. Ciò comporta che, realizzando le reti che modellano l' integrazione fra le parti, attraverso lo studio dei grafi di raggiungibilità, è possibile fare considerazioni in merito la possibilità di rilevare la presenza di malfunzionamenti non derivanti necessariamente da guasti.

Inoltre, grazie alla strutturazione modulare, è possibile restringere il punto relativo alla individuazione di quale dei componenti causa il problema nel funzionamento del sistema integrato. Ciò potrebbe contribuire a ridurre i tempi legati alle prove di integrazione.

Inoltre, mantenendo corrispondenza fra modelli e sistema reale, potrebbe essere possibile fornire un contributo alla progettazione del sistema di controllo.

Va aggiunto in proposito che, durante lo sviluppo dei modelli, mentre le reti “migliorate” consentivano di osservare i possibili stati del sistema che nascevano a seguito delle integrazioni “desiderate”, le reti contenenti errori di modellazione hanno fatto riflettere sulla possibilità di generazione di malfunzionamenti dovuti ad errori di logica. Il che, se tradotto in un sistema di controllo, potrebbe originare errori subdoli da identificare.

Bibliografia

- [1] N.Abbagnano,G.Fornero. *Filosofi e filosofie nella storia*. (Vol.II, Cap. 11,par. 2, pag.167)
- [2] H.G.Conway. *Landing Gear Design*.(1958)
- [3] I.Moir , A.Seabridge. *Aircraft Systems.Mechanical,electrical and avionics subsystems integration*.(Third edition)
- [4] N.Currey. *Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices*.(1988)
- [5] www.faa.gov/. *Aircraft Landing Gear Systems – Chapter13*
- [6] P.Chiacchio, F. Basile. *Tecnologie Informatiche per l'automazione* .(Seconda Edizione)
- [7] L.Sciavicco, B.Siciliano. *Robotica industriale*. (Seconda Edizione)
- [8] Marsan, Balbo,Conte, Donatelli, Franceschinis. *Modelling with Generalised Stochastic Petri Nets*.(1995)
- [9] A.Di Febbraro, A.Giua. *Sistemi ad eventi discreti*.(2002)
- [10] Emerson Industrial Automation. *Guida dell'utente Unidrive sp taglie da 0 a 6*.(Versione n.12)
- [11] Emerson Industrial Automation. *Guida dell'utente Moduli Applications*. (Versione n.2)
- [12] Abdelhafez,Forsyth. *A review of More-Electric Aircraft*. IEEE(2009)
- [13] Li,Fielding. *Preliminary study of EMA Landing Gear Actuation*. IEEE(2012)
- [14] Leveson,Stolzy . *Safety Analysis Using Petri Nets*. IEEE (1987)
- [15] E.M.Clarke,J.M.Wing. *Formal Methods: State of the Art and Future Directions*. ACM Computing Surveys (1996)
- [16] A.Fantechi,S.Gnesi.*Model Checking cos'è e come si applica*.Mondo Digitale n.2-3(giugno-settembre 2011)
- [17] Flammini, Mazzocca, Vittorini.*Modelli per l'analisi di sistemi critici* –. Mondo Digitale n.3 (settembre 2009)

- [18] Bernard Bethomieu, Francois Vernadat, LAAS/CNRS. *Time Petri Nets Analysis with TINA*. (IEEE2006)
- [19] M.P.Cabasino,A.Giua,C.Seatzu.*Diagnosability of Discrete-Event Systems Using Labeled Petri Nets*. (IEEE 2013)
- [20] A.KaratKevic,I. Grobelna. *Deadlock detection in Petri Nets: one trace for one deadlock?*. (IEEE 2014)
- [21] T.Wijekoon,L.Empringham,P.Wheeler. *Dual-output Motor Control Unit for an Electromechally Actuated Nose Landing Gear*. IEEE(2009).
- [22] T.Wijekoon,L.Empringham,P.Wheeler,J.C.Clare,C.Whitley,G.Towers. *Aircraft Electrical Landing Gear Actuation Using Dual-output Power Converter with Mutual Power Circuit Components*. IEEE(2009).
- [23] T.Wijekoon,L.Empringham,P.Wheeler,J.C.Clare. *Compact dual-output Power Converter for an Aerospace Electrical Landing Gear Actuation System*. IEEE(2009).
- [24] Hoffmann A.C.,Hansen I.G., Beach R.F., ET AL. *Advanced secondary power system for transport aircraft*. NASA technical paper 2463, May 1985.